

# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

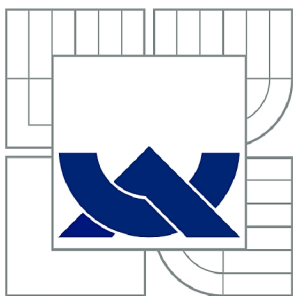
EXPERIMENTÁLNÍ BEZDRÁTOVÝ SPOJ V KMITOČTOVÉM PÁSMU  
60 GHz

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

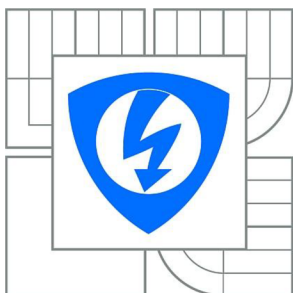
Bc. JIŘÍ LAMBOR

BRNO 2014



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ**

**ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

## **EXPERIMENTÁLNÍ BEZDRÁTOVÝ SPOJ V KMITOČTOVÉM PÁSMU 60 GHZ**

EXPERIMENTAL WIRELESS LINK IN FREQUENCY BAND 60 GHZ

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. JIŘÍ LAMBOR**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**prof. Dr. Ing. ZBYNĚK RAIDA**

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor  
**Elektronika a sdělovací technika**

**Student:** Bc. Jiří Lambor

**ID:** 125518

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2013/2014

## NÁZEV TÉMATU:

### Experimentální bezdrátový spoj v kmitočtovém pásmu 60 GHz

#### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Vypracujte porovnání komerčně dostupných transceiverů pracujících v pásmu 60 GHz. Vyberte systém vhodný pro realizaci bezdrátových spojů uvnitř automobilů. Vybraný systém doplňte vhodnými anténami a vytvořte jednoduchý testovací spoj.

Vytvořený testovací spoj využijte uvnitř automobilu k rozsáhlému testování spoje pro různé konfigurace interiéru automobilu, různý počet cestujících osob, různé pozice antén. Výsledky měření statisticky zpracujte a zformulujte doporučení pro realizaci spoje.

#### DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] DANIELS, R.C.; HEATH, R.W. 60 GHz wireless communications: emerging requirements and design recommendations. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2007, vol. 2, no. 3, p. 41–50.

[2] PETER, M., FELBECKER, R., KEUSGEN, W., HILLEBRAND, J. Measurement-based investigation of 60 GHz broadband transmission for wireless in-car communication. In Proceedings of 2009 IEEE Vehicular Technology Conference Fall (VTC 2009-Fall), 2009, p. 1-5.

**Termín zadání:** 10.2.2014

**Termín odevzdání:** 23.5.2014

**Vedoucí práce:** prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida

**Konzultanti diplomové práce:**

**doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.**

*Předseda oborové rady*

#### UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **ABSTRAKT**

Práce se zabývá problematikou spojů v kmitočtovém pásmu 60 GHz. V této oblasti je vykazován vysoký útlum atmosférou způsobený rezonancí molekul kyslíku. Toho může být využito pro oddělení jednotlivých vytvořených sítí. V dokumentu jsou porovnány dostupné transceivry několika výrobců. Dále je práce zaměřena na návrh, simulaci a výrobu soustavy napáječe a antény pracující na kmitočtu 60 GHz. Trychtýřová anténa je navrhunuta na technologii SIW

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

SIW, E-pásmo, vlnovod, trychtýřová anténa

## **ABSTRACT**

This thesis is focused on a wireless link operating in 60 GHz frequency band. In this band, the attenuation due to resonance of oxygen is high. Thanks to this property, we are able to ensure a proper insulation of communication links working in two close bands. The document compares commercially available modules of offered by different manufacturers for the operation in this band. The design, the simulation and the fabrication of a antenna and its feeder are described in the next part of the thesis. The system is fabricated using a SIW technology.

## **KEYWORDS**

SIW, E-band, waveguide, horn antenna

LAMBOR, Jiří *Experimentální bezdrátový spoj v kmitočtovém pásmu 60 GHz*: diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2014. 52 s. Vedoucí práce byl prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida,



## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Experimentální bezdrátový spoj v kmitočtovém pásmu 60 GHz“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno .....

.....

(podpis autora)

## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce panu prof. Dr. Ing. Zbyňku Raidovi dále Ing. Tomáši Mikuláškov, Ph. D ,Ing. Tomáši Urbancovi, Ph. D, Ing. Davidu Wolanskému a Ing. Kamilu Pítorovi za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Brno .....

.....

(podpis autora)



Faculty of Electrical Engineering  
and Communication  
Brno University of Technology  
Purkynova 118, CZ-61200 Brno  
Czech Republic  
<http://www.six.feec.vutbr.cz>

## PODĚKOVÁNÍ

Výzkum popsany v této diplomové práci byl realizován v laboratořích podpořených z projektu SIX; registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operační program Výzkum a vývoj pro inovace.

Brno .....

.....

(podpis autora)



EVROPSKÁ UNIE  
EVROPSKÝ FOND PRO REGIONÁLNÍ ROZVOJ  
INVESTICE DO VAŠÍ BUDOUCNOSTI



# OBSAH

<b>Úvod</b>	<b>12</b>
<b>1 Radiové spoje</b>	<b>13</b>
1.1 Úvod . . . . .	13
1.2 Radiové spoje v oblasti milimetrových vln . . . . .	13
<b>2 Přehled možných řešení spoje na kmitočtu 60 GHz</b>	<b>15</b>
2.1 Komerčně dostupné moduly . . . . .	15
2.1.1 Gotmic . . . . .	15
2.1.2 Hittite . . . . .	16
2.1.3 Sivers Ima . . . . .	17
2.1.4 Peraso . . . . .	18
2.2 Vektorový obvodový analyzátor . . . . .	19
2.3 Konvertor do mezipásmu . . . . .	19
2.4 Porovnání jednotlivých způsobů řešení . . . . .	20
<b>3 Návrh spoje</b>	<b>23</b>
3.1 Vlnovod integrovaný do substrátu . . . . .	23
3.1.1 Struktura SIW a její návrh . . . . .	23
3.1.2 Přizpůsobení SIW k napájecímu vedení . . . . .	25
3.2 Sektorová trychtýřová SIW anténa . . . . .	29
3.3 Sjednocení napáječe a antény . . . . .	36
<b>4 Realizace návrhu</b>	<b>39</b>
<b>5 Závěr</b>	<b>40</b>
<b>Literatura</b>	<b>41</b>
<b>Seznam symbolů, veličin a zkratk</b>	<b>44</b>
<b>Seznam příloh</b>	<b>45</b>
<b>A Pomocné skripty v prostředí Matlab</b>	<b>46</b>
A.1 Skript grafického vyobrazení přenosové rychlosti na vzdálenosti . . . . .	46
A.2 Skrip pro výpočet SIW vlnovodu a přechodu na mikropásek . . . . .	47
<b>B Výkresová dokumentace</b>	<b>49</b>
B.1 Přechodka WR10-SIW . . . . .	49

B.2 Motiv trychtýřové antény . . . . .	51
----------------------------------------	----

# SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Přidělení bezlicenčního pásma na kontinentech [3] . . . . .	14
2.1	Bloková struktura obvodů první a druhé generace (TXS060A01, TXS060A02) [7] .	16
2.2	Bloková struktura obvodů třetí generace (TXQ060A01) [8] . . . . .	16
2.3	Bloková struktura přijímače HMC6001. [10] . . . . .	17
2.4	Blokové schéma FC1005V/00 s vyobrazeným modulem [12] . . . . .	18
2.5	Bloková struktura obvodu PRS1021 [13] . . . . .	19
2.6	Blokové schéma uvažované struktury spoje . . . . .	20
2.7	Bilance pasivního řešení . . . . .	22
2.8	Bilance spoje s produktem Sivers Ima . . . . .	22
3.1	Znázornění struktury SIW a její parametry [17] . . . . .	23
3.2	Vytvořená struktura SIW . . . . .	25
3.3	Rozložení příčné složky intenzity elektrického pole v SIW pro $f = 60$ GHz. . . . .	26
3.4	Kmitočtový průběh parametru S11 (červená) a S21 (zelená) SIW struktury . . . . .	26
3.5	Přizpůsobení přechodu mezi SIW a mikropáskem pomocí zkosení . . .	26
3.6	S11 (červená) a S21 (zelená) parametry přechodu pomocí zkosení v závislosti na frekvenci . . . . .	27
3.7	Model schodovitého přechodu mezi SIW a vlnovodem v řezu . . . . .	27
3.8	Frekvenční závislost S11 (červená) a S21 (zelená) parametru schodo- vitého přizpůsobení . . . . .	28
3.9	Model dílce schodovitého přechodu . . . . .	28
3.10	Vyobrazení sektorové trychtýřové antény vyzařující v H-rovině [21] . .	29
3.11	Geometrie trychtýřové antény [21] . . . . .	30
3.12	Model trychtýřové antény na vlnovodu vyplněné dielektrikem . . . . .	30
3.13	Činitel odrazu trychtýřové antény v závislosti na frekvenci . . . . .	30
3.14	Ukázka antény s vloženým rezonátorem [22] . . . . .	31
3.15	Model sestavy antény s rezonátory . . . . .	31
3.16	Směrové charakteristiky v E a H-rovině antény s rezonátory, $f = 60$ GHz . . . . .	32
3.17	Kmitočtová závislost S11 parametru antény s rezonátory . . . . .	32
3.18	Příklad rozdělení rezonátorů pro zlepšení S11 parametru [22] . . . . .	33
3.19	Modely SIW antén s plnými a rozdělenými pásky . . . . .	33
3.20	Vyzařovací charakteristiky antén s plnými (červená) a rozdělenými pásky (zelená) v H-rovině, $f = 60$ GHz. . . . .	33
3.21	Porovnání S11 SIW antény s plnými pásky (červená) a dělenými (zelená)	34
3.22	Konečný model SIW antény . . . . .	35

3.23	Kmitočtový průběh S11 parametru konečného modelu SIW trychtýřové antény . . . . .	35
3.24	Vyzařovací charakteristika v E-rovině (vlevo) a H-rovině, $f = 60$ GHz . . . . .	35
3.25	Model celkové sestavy napáječe a SIW antény . . . . .	36
3.26	Směrová charakteristika celkového modelu antény a napáječe, $f = 60$ GHz . . . . .	36
3.27	Vyzařovací charakteristika v E-rovině celkové sestavy napáječe a antény, $f = 60$ GHz . . . . .	37
3.28	Vyzařovací charakteristika v H-rovině celkové sestavy napáječe a antény, $f = 60$ GHz . . . . .	37
3.29	Frekvenční závislost činitele odrazu celkového modelu napáječe antény . . . . .	38
4.1	Vyobrazení výrobku . . . . .	39
B.1	Výkres vrchního dílu přechodky WR10-SIW . . . . .	49
B.2	Výkres spodního dílu přechodky WR10-SIW . . . . .	50
B.3	Motiv SIW antény TOP v měřítku 3:1 . . . . .	51
B.4	Motiv SIW antény BOTTOM v měřítku 3:1 . . . . .	52

## SEZNAM TABULEK

2.1	Porovnání modulů společnosti Gotmic . . . . .	15
2.2	Porovnání modulů společnosti Hittite . . . . .	17
2.3	Porovnání modulů společnosti Sivers Ima . . . . .	18
2.4	Parametry Peraso PRS1021 . . . . .	18
3.1	Parametry vlnovodu na substrátu . . . . .	25
3.2	Parametry trychtýřové antény s rezonátory . . . . .	32
3.3	Parametry výsledné trychtýřové antény s rezonátory . . . . .	34



# ÚVOD

V posledních letech věnují výrobci dopravních prostředků pozornost vývoji systému bezdrátové komunikace v pásmu 60 GHz. Atmosféra v tomto pásmu vykazuje velmi vysoký útlum, který lze s výhodou využít k prostorovému oddělení dílčích komunikačních kanálů. Velká šířka kanálu v tomto pásmu umožňuje přenos velkého objemu dat vysokou rychlostí, jako je např. video s vysokým rozlišením.

Předložená diplomová práce se nejprve věnuje možnostem implementace komunikačního systému pracujícího v pásmu 60 GHz v osobním automobilu. Práce navazuje na výsledky výzkumu, které publikoval tým univerzity v Braunschweigu (Německo).

Původním záměrem projektu bylo prozkoumat dostupnost transceiverů pro pásmo 60 GHz a vybraný transceiver využít pro sestavení experimentálního spoje pracujícího uvnitř testovacího vozu. Testovacím vozem je Octavia III Limousine poskytovaná firmou Škoda Auto, a. s.

Vzhledem k nedostatku prostředků na nákup transceiveru bylo rozhodnuto po dohodě s vedoucím práce, že bude navržena koncepce vlastního systému, počítačovou simulací ověřena její funkčnost a poté daná koncepce zrealizována. Systém je složen z antény a vhodného přechodu na měřicí zařízení (vektorový obvodový analyzátor).

Původním plánem bylo také provést komplexní měření v automobilu. Tento bod ovšem nebyl splněn. Důvodem nesplnění bodu zadání byly nepříznivé výsledky simulované struktury a také změna koncepce. Přechod systému byl původně zamýšlen pomocí koaxiálního konektoru připojeného k mikropáskovému vedení. Po konzultacích a zvážení možných problémů v daném kmitočtovém pásmu (dostupnost a cena vhodného konektoru) bylo od této myšlenky opuštěno. Jako přechod byla zvolena vlnovodná struktura se schodovitým přizpůsobením k substrátu antény. Vzhledem k výšce substrátu a pracovnímu kmitočtu, nebyl triviální problém přizpůsobit činitel odrazu planární trychtýřové antény. Konečnou strukturu tak předcházelo několik různých návrhů, než bylo dosaženo požadovaného výsledku.

Kapitola 2 předložené práce vzájemně porovnává komerčně dostupné komunikační moduly pro práci v pásmu 60 GHz. Kapitola 3 je věnována návrhu vlastního systému a ověření jeho funkčnosti počítačovou simulací. Kapitola 4 práci uzavírá.

# 1 RADIOVÉ SPOJE

## 1.1 Úvod

V průběhu sta let bezdrátový přenos informace zaznamenal mnoho milníků. Ať jde již o samotnou myšlenku a první realizace radiového přenosu, plošné rozhlasové vysílání, přechod od analogového k digitálnímu zpracování či rozmach domácích WiFi sítí. Další vývoj vždy podnítl již nedostatečná kapacita daného radiového kanálu, proto je neustále posouvána hranice využitelných kmitočtových pásem.

V poslední době nabývá na významu využití nelicencovaného pásma v okolí kmitočtu 60 GHz. Jeho charakteristikou je relativně vysoký útlum šířením volným prostorem, ale také, specificky pro okolí 60. GHz, vysoký atmosferický útlum způsobený rezonancí molekul kyslíku. Tyto vlastnosti předurčují toto pásmo jako vhodného kandidáta pro sítě PAN (osobní sítě – Personal Area Network) a WLAN (bezdrátové lokální sítě – Wireless Local Area Network).

## 1.2 Radiové spoje v oblasti milimetrových vln

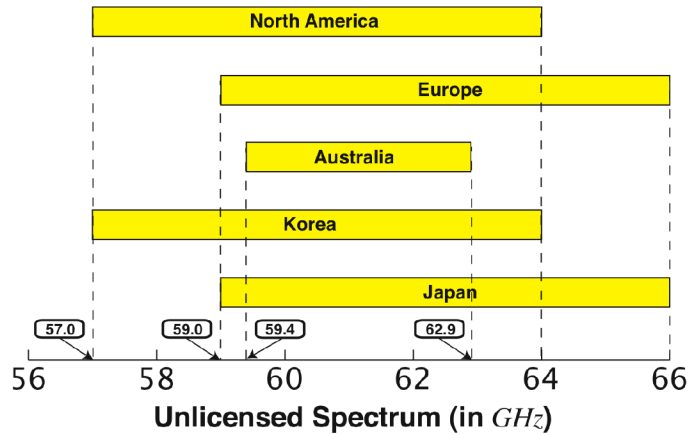
Dominantním fyzikálním jevem, který provází bezdrátovou komunikaci v kmitočtovém pásmu 60 GHz, je vysoký útlum atmosféry. Hodnotu útlumu můžeme vypočíst dle vztahu 1.1, kde  $r$  je dráha mezi vysílačem a přijímačem,  $\lambda$  udává vlnovou délku.

$$L_o = \left( \frac{r \cdot 4 \cdot \pi}{\lambda} \right)^2 \quad (1.1)$$

Spoj na 60 GHz vykazuje při délce spoje 1 m přibližně o 28 dB vyšší útlum oproti spoji pracujícím v okolí kmitočtu 2,4 GHz. Této zdánlivé nevýhody lze využít při budování sítí typu PAN a WLAN, kde se využije právě velkého útlumu k oddělení jednotlivých sítí.

Dalším problémem je volba vhodného typu aktivního prvku, předpokladem pro rozšíření zařízení je přijatelná cena pro koncové uživatele. Jako perspektivní se ukazuje výroba prvků technologií CMOS (komplementární polovodiče na bázi metaloxidu – Complementary Metal Oxide Semiconductor), kde tranzitní kmitočet nyní dosahuje několika stovek GHz. [1]

Spoje v pásmu 71 - 76 GHz a 81 - 86 GHz jsou licencovány (regulovány). Díky tomu je minimalizováno vzájemné rušení, proto jsou tyto spoje vhodné pro Bod-Bod komunikaci [2] Pásmo 60 GHz je nelicencované, umožňuje tedy rychlý vývoj aplikací, jenž řídí pouze trh. Tato oblast je vhodná pro osobní sítě typu PAN, které jsou velmi atraktivní pro výrobce mobilních zařízení za účelem přenosu multimedií



Obr. 1.1: Přidělení bezlicenčního pásma na kontinentech [3]

vysokorychlostní sítě. Dokument se dále tedy bude věnovat oblasti v okolí kmitočtu 60 GHz.

Jak lze vidět z obr.1.1 spektrum je v tomto pásmu téměř na všech kontinentech volně dostupné a minimálně v jednom kanálu se všechny překrývají. To je další výhodou pro výrobce komerčních zařízení.

Dalším kladem je, že v první dekádě 21. století začaly vznikat nové standardy předpokládající využití spojů v milimetrovém pásmu, což podporuje rychlost zavádění a kompatibilitu nových zařízení. Lze je rozdělit na dvě kategorie[1]:

- standardy pro sítě PAN (IEEE 802.15.3c, WirelessHD)
- standardy pro sítě WLAN (IEEE 802.11ad – WiGig)

Tyto dokumenty definují fyzickou ,MAC (přístupová metoda k médiu – Medium Acces Control) vrstvu, paketovou strukturu, atd.[4] [5].

## 2 PŘEHLED MOŽNÝCH ŘEŠENÍ SPOJE NA KMITOČTU 60 GHz

Cílem této části bude teoreticky navrhnout experimentální spoj pracující na kmitočtu 60 GHz. Jako řešení se nabízí několik možností. Jednou z nich je vytvoření spoje na bázi již komerčně dostupného modulu, umožňujícího duplexní provoz rádiového spoje. Takových zařízení je na trhu několik a budou popsány dále. Další možností je měření parametrů spoje s komerčně dostupnými měřicími přístroji (vektorový analyzátor s hlavicí pro dané kmitočtové pásmo). Poslední uvažovanou možností je vytvoření jednoduchého konvertoru pro mezispásmo 4 GHz a následného vyhodnocování signálu vektorovým analyzátozem.

### 2.1 Komerčně dostupné moduly

V této kapitole budou představeny komerčně dostupné transceivery pracující v pásmu milimetrových vln. Výrobou takových zařízení se nyní věnuje několik firem.

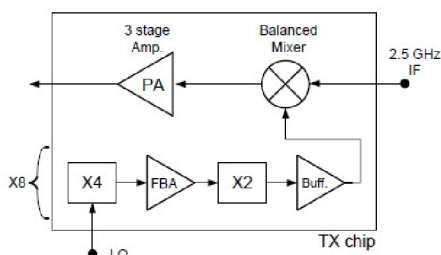
#### 2.1.1 Gotmic

Švédská společnost zabývající se návrhem a prodejem vysokofrekvenčních prvků převážně pro kmitočtová pásma E (60-90 GHz) a W (75-110 GHz). V její nabídce jsou diskrétní řešení jednotlivých prvků, ale také již kompletní moduly přijímačů a vysílačů, jež výrobce označuje jako multifunkční čipy. Pro pásmo 60 GHz má společnost v nabídce několik řešení. Všechny jsou vyráběny jako MMIC (monolitický mikrovlnný integrovaný obvod – Monolithic microwave integrated circuit) na struktuře GaAs technologií HEMT (tranzistor s vysokou pohyblivostí elektronů – High electron mobility transistor). V dnešní době je (2013) k dispozici již třetí generace těchto čipů. Parametry jednotlivých obvodů jsou uvedeny níže v tabulce 2.1.[6]

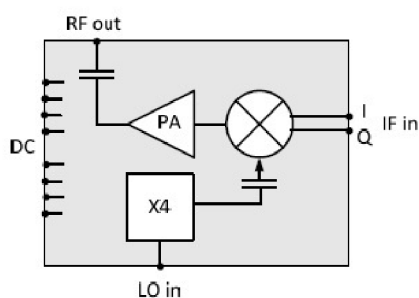
Modul	RF BW [GHz]	IF BW [GHz]	Konv. zisk [dB]	Pout [P1dB]	NF [dB]
TXS060A01	53-61	1,25-2,75	5,2	3,3 dBm	-
RXS060A01	55-63	0-3,2	8,5	-	10,5
TXS060A02	56,5-64,5	1,9-3,7	0,6	5,6 dBm	-
RXS060A02	54,5-64,5	1,3-3,2	12,9	-	7,2
TXQ060A01	56-63,5	0-8	10	9 dBm	-
RXQ060A01	57-66	0-8	10	-	8,5

Tab. 2.1: Porovnání modulů společnosti Gotmic

První a druhá generace se liší v typu použité technologie. První využívá pHEMT a druhá nHEMT. Třetí generace se odlišuje od druhé IQ (soufázová a kvadrurní složka – Inphase and Quadrature) složek. Obvody tedy pracují s konverzí na mezi-frekvenci a vyžadují připojení externího oscilátoru. Dle typu je frekvence oscilátoru 4x až 8x nižší než nosná frekvence. Bloková struktura čipů je na obr. 2.1 a obr. 2.2.



Obr. 2.1: Bloková struktura obvodů první a druhé generace (TXS060A01, TXS060A02) [7]



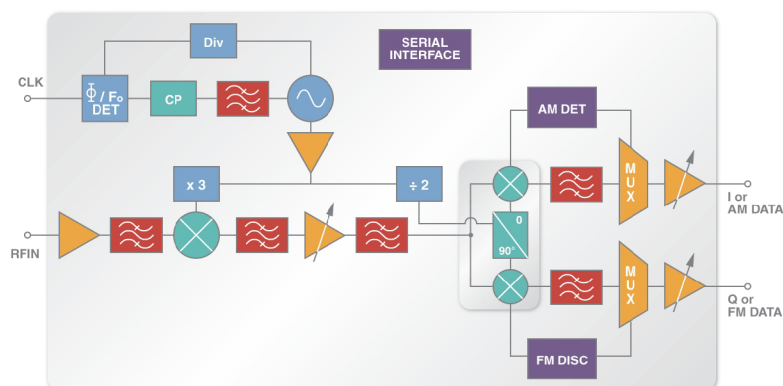
Obr. 2.2: Bloková struktura obvodů třetí generace (TXQ060A01) [8]

## 2.1.2 Hittite

Tato Americká firma působící na poli vysokofrekvenčních prvků nabízí ve svém portfoliu také obvody pracující v oblasti 60 GHz. Jedná se již o kompletní řešení, zpracovávají jsou IQ složky v základním pásmu, přiveden je pouze referenční oscilátor. Moduly jsou nabízeny s vývodem pro anténu, nebo jí mají přímo integrovanou. Toto řešení výrobce označuje jako AiP (anténa itegrovaná v pouzdru – Antenna in Package). Integrovaná anténa přímo v čipu nabízí výhodu ve snadnější implementaci do koncového zařízení, kdy vývojář nemusí řešit problematiku vysokofrekvenčního vedení [9]. Komunikace s čipem probíhá pomocí třívodičového sériového rozhraní. Jako výchozí substrát je použit SiGe s použitou technologií BiCMOS (kombinace bipolárních a CMOS tranzistorů na jednom čipu). Níže v tabulce 2.2 je porovnání obvodů fy. Hittite. Bloková struktura obvodu je zobrazena na obr. 2.3

Modul	RF BW [GHz]	Pout [P1dB]	Ant. zisk [dBi]	Říditelný zisk [dB]	NF [dB]
HMC6000	57-64	12	-	17	-
HMC6001	57-64	-	-	65	6
HMC6000LP711E	57-64	11	7,5	17	-
HMC6001LP711E	57-64	-	7,5	65	7

Tab. 2.2: Porovnání modulů společnosti Hittite

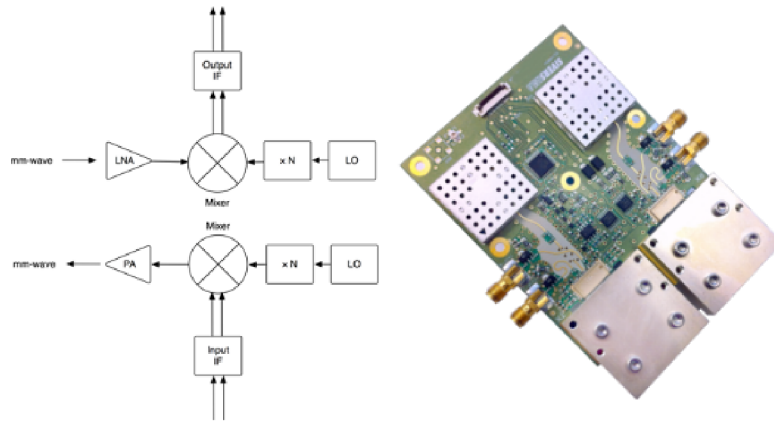


Obr. 2.3: Bloková struktura přijímače HMC6001. [10]

Společnost také nabízí vývojový kit označený HMC6450 obsahující desky s čipy HMC6000LP711E a HMC6001LP711E. Všechny potřebné obvody jsou již implementovány na deskách. Moduly jsou ovládány pomocí USB (univerzální seriové rozhraní – Universal Serial Bus ) a IQ složky jsou přivedeny pomocí SMA konektorů.

### 2.1.3 Sivers Ima

V nabídce této společnosti najdeme zařízení vhodné pro realizaci cíle této práce. Jedná se o moduly s označením FC1003V/01 a FC1005V/00 pracující v okolí kmitočtu 60 GHz. FC1005V/00 se liší implementovaným lokálním oscilátorem. Zařízení pracují s kvadraturní IQ mezifrekvenčí (1-5 GHz), kterou převádí na požadovaný kmitočet (58-63 GHz). Mezifrekvence IF je přivedena pomocí SMA konektorů, vysokofrekvenční část je napájena vlnovodem. Každá jednotka obsahuje nezávislý přijímač i vysílač, může být tedy použita v plném duplexu. Řízení je zprostředkováno pomocí I2C sběrnice. Parametry obvodu jsou uvedeny v tabulce 2.3 [11]. Blokové schéma modulu je na obrázku 2.4



Obr. 2.4: Blokové schéma FC1005V/00 s vyobrazeným modulem [12]

Modul	RF BW [GHz]	IF BW [GHz]	Pout [P1dB]	Říditelný zisk [dB]	NF [dB]
FC1005V/00-TX	58-63	1-5	10	15	-
FC1005V/00-RX	58-63	1-5	-	12	8

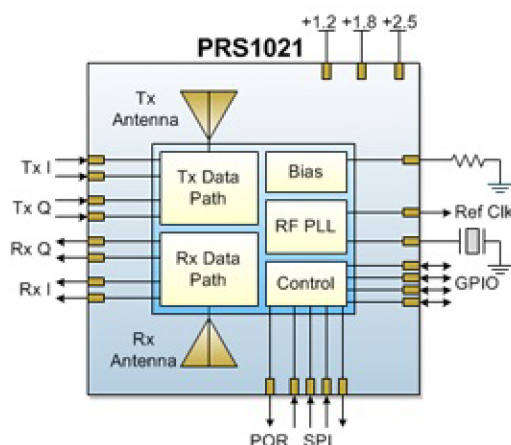
Tab. 2.3: Porovnání modulů společnosti Sivers Ima

### 2.1.4 Peraso

Firma je jedním ze zakládajících členů WiGig aliance, specializující se na vývoj a výrobu 60 GHz obvodů. V nabídce nalezneme modul s označením PRS1021. Jedná se o přijímač i vysílač v jednom pouzdru s integrovanou vysílací i přijímací anténou[13]. Zpracovává signál na mezifrekvenčním pásmu s IQ složkami. Řízení obvodu je možné pomocí SPI (seriové komunikační rozhraní – Serial Peripheral Interface ) a GPIO (obecně vstupně/výstupní porty – General Purpose Input/Output ). Na obrázku 2.5 je vyobrazena bloková struktura zařízení. Výrobce také nabízí vývojový kit řízený pomocí USB, kde jsou již všechny potřebné součásti obsaženy. Kit obsahuje SMA konektory pro přivedení mezifrekvence [14]. Vybrané parametry obvodu jsou v tabulce 2.4.

Modul	RF BW [GHz]	Pout [dBm]	Ant. zisk [dB]	Max. RX vstupní výkon [dBm]	NF [dB]
PRS1021	57-66	8	8,5	-28	6

Tab. 2.4: Parametry Peraso PRS1021



Obr. 2.5: Bloková struktura obvodu PRS1021 [13]

## 2.2 Vektorový obvodový analyzátor

Tato možnost předpokládá využití komerčně dostupného vektorového analyzátoru. Jako přijímací a vysílací anténa může být využito otevřeného ústí vlnovodu, nebo vhodné antény pro dané kmitočtové pásmo.

Toto řešení nabízí velmi rychlé sestavení spoje, nevýhodou je ovšem jednorúčelovost zapojení, kdy je spoj využit jen pro měření parametrů dané antény, popřípadě parametry spoje.

## 2.3 Konvertor do mezipásma

Vytvoření spoje pro pásmo 60 GHz vyžaduje vhodný prostředek pro konverzi z mezipásma na přenosové pásmo a zpět. Nejjednodušším způsobem je použití pasivního směšovače s nelineárním prvkem.

Jak je obecně známo, do směšovače přivádíme IF (mezifrekvenční signál – Intermediate Frequency) a nosnou frekvenci na kmitočtu LO (nosná frekvence – Local Oscillator). Aplikací těchto složek na nelineární prvek (dioda) dostáváme spektrum s kmitočty definovanými podle rovnice 2.1 [15].

$$f_{OUT} = m \cdot LO + n \cdot f_{IN} \quad (2.1)$$

kde:

$f_{OUT}$       výstupní signál  
 $LO$         nosná frekvence



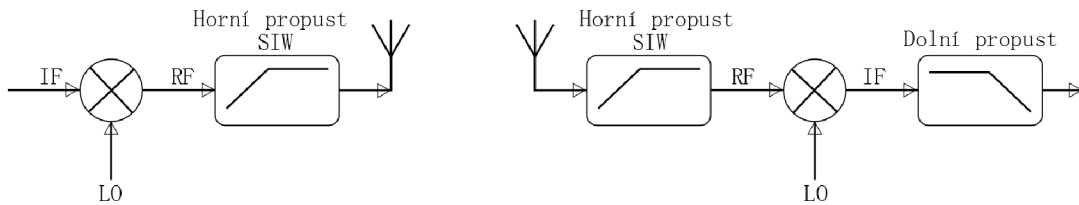
$f_{IN}$  vstupní signál  
 $m, n$  celá čísla

Ve výstupním spektru je tedy obsaženo mnoho kombinací vstupních signálů a jejich vyšších harmonických obrazů. Pro nás jsou ovšem důležité jen produkty:

$$LO + f_{IN}$$

$$LO - f_{IN}$$

Je tedy zřejmé, že potřebná frekvence oscilátoru LO je 60 GHz. Na tak vysokém kmitočtu nastávají potíže jednak s generací, ale také s distribucí signálu. Je proto výhodné použít techniku harmonického směšovače, kdy vhodným zapojením nelineárních prvků (diod) dochází k násobení kmitočtu lokálního oscilátoru. [16]



Obr. 2.6: Blokové schéma uvažované struktury spoje

Zapojení vyžadující poloviční kmitočet oscilátoru je uskutečněno pomocí dvou diod zapojených antiparalelně.

Na obrázku 2.6 je znázorněna předpokládaná struktura takového spoje. V levé části je vyobrazena vysílací část. Do směšovače vstupuje mezifrekvenční signál IF spolu s nosnou frekvencí LO. LO je díky použití harmonického směšovače (antiparalelní zapojení diod) poloviční, tedy 30 GHz. Vysokofrekvenční výstup RF (vysokofrekvenční signál – Radio Frequency) směšovače je upraven horní propustí za použití struktury SIW (vlnovodná struktura na substrátu – Substrate Integrated Waveguide). Poté je signál přiveden na vysílací anténu a emitován do prostoru.

V přijímači je signál z antény opět horní propustí na struktuře SIW omezen, poté přiveden do směšovače jako vysokofrekvenční signál RF a spolu s nosnou frekvencí LO vytvoří na nelineární prvku směšovací produkty. Výstup mezifrekvenčního signálu IF je pomocí dolní propusti vyselektován na požadované pásmo.

## 2.4 Porovnání jednotlivých způsobů řešení

Pro volbu vhodného způsobu řešení provedeme studii možných vlastností spoje. Bude nás zajímat maximální dosažitelná vzdálenost spoje pro danou modulaci a také maximální dosažitelná rychlost.

Budeme tedy uvažovat spoj na středním kmitočtu  $f_c = 60,48$  GHz se šířkou pásma  $Bw = 1,8$  GHz. Toto odpovídá jednomu přenosovému kanálu dle standardů. Použita bude modulace BPSK s potřebným poměrem  $E_b/N_0 = 11,1$  pro chybovost menší jak  $10^{-6}$ .

Pomocí výše uvedených hodnot můžeme určit poměr signálu ku šumu na nosné  $C/N$  2.2

$$\frac{C}{N} = \frac{E_b}{N_0} \cdot \frac{fb}{Bw} \quad (2.2)$$

kde:

$\frac{C}{N}$	poměr signálu nosné ku šumu
$\frac{E_b}{N_0}$	poměr energie na bit ku spektrální výkonové hustotě
$fb$	přenosová rychlost
$Bw$	šířka pásma

Nyní chceme vyjádřit velikost vysílacího výkonu z poměru  $C/N$ . Potřebujeme tedy znát výkon šumu v daném pásmu 2.3.

$$N = k \cdot T \cdot Bw \quad (2.3)$$

kde:

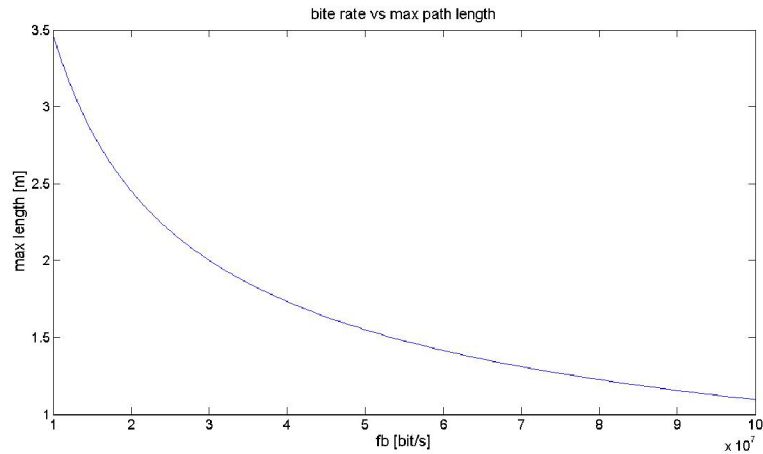
$k$	Boltzmanova konstanta
$T$	efektivní teplota (uvažováno 290 K)
$Bw$	udává šířku pásma

Jelikož přijímač vykazuje vlastní příspěvek šumu, připočteme k výslednému výkonu šumu  $N$  v dB šumové číslo značené  $NF$  opět v dB. Pro minimální přijímaný výkon tedy platí 2.4 (uvažováno v dB)

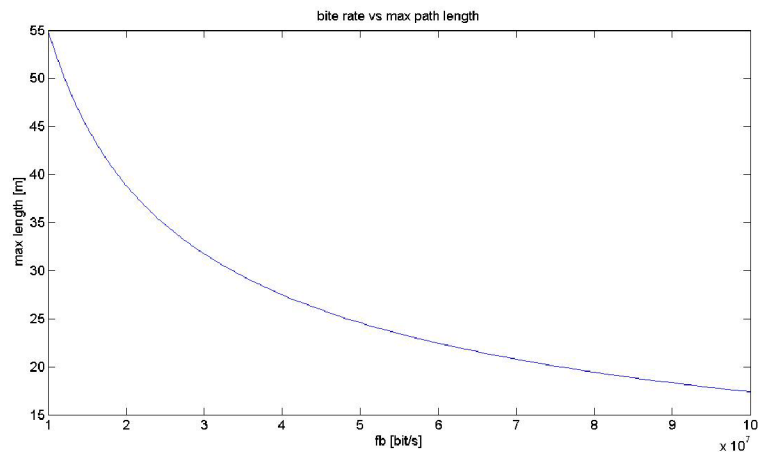
$$C = \frac{C}{N} + N + NF \quad (2.4)$$

kde:

$C$	minimální přijímaný výkon
$\frac{C}{N}$	poměr signálu nosné ku šumu
$N$	výkon šumu v daném pásmu
$NF$	šumové číslo



Obr. 2.7: Balance pasivního řešení



Obr. 2.8: Balance spoje s produktem Siverson Ima

Nyní máme hodnotu minimálního přijímaného výkonu potřebného pro zaručenou chybovost dané modulace a můžeme tedy určit, při uvažování vysílacího výkonu  $P_{out}$ , rezervy spoje a zisku antén  $G_{ant}$ , závislost délky spoje na přenosové rychlosti.

Pokud uvažujeme umístění systému v automobilu, bude nás zajímat vzdálenost spoje do 4 m. To odpovídá přibližně maximální vzdálenosti trasy spoje v automobilu. Grafické vyobrazení pro pasivní řešení s parametry ( $P_{out} = -10\text{dBm}$ , RX a TX anténní zisk  $G_{ant} = 6\text{dB}$ ,  $NF = 12\text{ dB}$  a rezerva spoje  $res = 4\text{ dB}$ ) je na obrázku 2.7.

Porovnáme-li výše uvedenou pasivní konfiguraci s vybraným řešením firmy Siverson Ima ( $P_{out} = 10\text{dBm}$ , RX a TX anténní zisk  $G_{ant} = 6\text{dB}$ ,  $NF = 8\text{ dB}$  a rezerva spoje  $res = 4\text{ dB}$ ) na obr. 2.8. Lze usoudit, že aktivní řešení poskytuje nižší šumové číslo a vyšší výkonovou rezervu.

### 3 NÁVRH SPOJE

V této kapitole bude popsán návrh a simulace jednotlivých částí spoje. Práce bude soustředěna na volbu vhodné antény pro kmitočtové pásmo 60 GHz. Nejprve bude proveden návrh vlastního SIW spolu s problematikou přechodu na napájecí vedení, poté bude proveden návrh sektorové trychtýřové antény a jejího přizpůsobení danému pásmu. Pro simulace bude využito softwaru CST microwave studio s využitím modulu *Transient Solver*. Okrajové podmínky byly nastaveny jako otevřené s přidáním prostorem (open, add space).

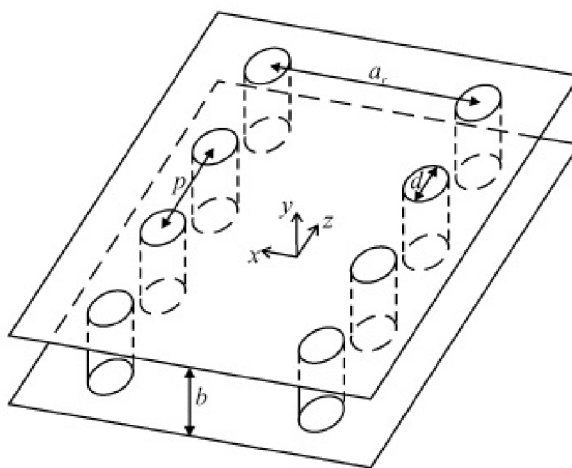
#### 3.1 Vlnovod integrovaný do substrátu

Vlnovod integrovaný do substrátu tvoří kompromis mezi mikropáskovým vedením a kovovým vlnovodem. Výhodou jsou nízké výrobní náklady, vyšší činitel jakosti  $Q$  oproti mikropáskovému vedení, možnost přenášet relativně vysoké výkony. Jako nevýhodu můžeme zmínit vyšší ztráty v dielektriku.

V této části bude vytvořen návrh jednoduchého SIW. Také zde bude řešena problematika vhodného připojení na napájecí vedení.

##### 3.1.1 Struktura SIW a její návrh

Na obr. 3.1 je znázorněna struktura vlnovodu na substrátu a její popis pomocí parametrů.



Obr. 3.1: Znázornění struktury SIW a její parametry [17]

$a_r$  udává šířku mezi středy prokovů stěn,  $b$  výška dielektrika,  $d$  je průměr prokovu,  $p$  vzdálenost sousedních děr.

Jedná se tedy o jednoduchou strukturu, kdy mezi dvěma vodivými deskami jsou vytvořeny dvě rovnoběžné řady prokovených děr. V takovém systému se vytvoří vlnovodný kanál. Parametry takto vytvořené SIW struktury odpovídají běžnému vlnovodu se šířkou  $a_e$ . Předpokladem bude šíření módu  $TE_{10}$ , z toho důvodu výška substrátu nemá velký vliv na parametry takového vlnovodu

Návrh vlnovodu vyžaduje dodržení několika podmínek na volbu parametrů pro zajištění správné funkce [19]. Průměr prokovů musí splňovat podmínku 3.1. Vzdálenost dvou děr musí vyhovovat 3.3.

$$d < \frac{\lambda}{5} \quad (3.1)$$

kde:

$\lambda$       délka vlny ve vlnovodu

Pokud dosadíme za hodnotu  $\lambda$ :

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (3.2)$$

kde:

$\lambda_0$       délka vlny ve vakuu  
 $\epsilon_r$       relativní permitiva materiálu  
 $c$       rychlost světla ve vakuu  
 $f$       pracovní kmitočet

Dosadíme-li tedy vypočtenou vlnovou délku do vztahu 3.1 získáme hodnotu pro určení potřebného průměru prokovů. Z výsledku tedy zvolíme průměr prokovů, který splňuje tuto podmínku:  $d = 0,5$  mm.

S ohledem na podmínku 3.3 byla zvolena rozteč  $p = 0,76$  mm.

$$p \leq 2 \cdot d \quad (3.3)$$

Postup návrhu dále odpovídá běžnému vlnovodu. Zvolíme pracovní kmitočet vlnovodu. Z důvodu, že obecný vlnovod nemá využitelné celé své pásmo jednovodnosti, musíme toto zohlednit násobením vhodným koeficientem. Protože je vlnovod vyplněn dielektrikem o permitivitě  $\epsilon_r$ , zmenší se délka vlny ve vlnovodu. Ekvivalentní délka  $a_e$  tedy odpovídá 3.4

$$a_e = \frac{c \cdot 1,25}{2 \cdot f \cdot \sqrt{\epsilon_r}} \quad (3.4)$$

Po dosazení hodnot byla určena ekvivalentní délka  $a_e = 2,1$  mm.

Rozteč děr určíme dle empirického vztahu 3.5 [20]

$$a_e = a - 1,08 \cdot \frac{d^2}{p} + 0,1 \cdot \frac{d^2}{a} \quad (3.5)$$

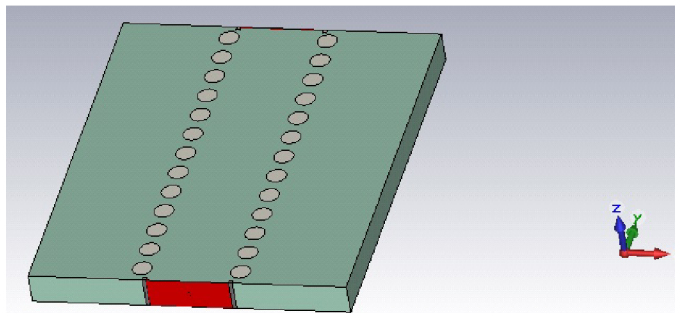
Iterativním způsobem byla zjištěna rozteč děr SIW  $a_r = 2,5$  mm.

Vypočtené a zjištěné parametry pro SIW jsou v tab. 3.1. Jako substrát byl zvolen Arlon Cuclad 217.

$\epsilon_r$ [-]	f[GHz]	d[mm]	p[mm]	h[mm]	$a_e$ [mm]	$a_r$ [mm]
2,17	60	0,5	0,76	0,7874	2,1	2,5

Tab. 3.1: Parametry vlnovodu na substrátu

V prostředí CST Microware Studio byla vytvořena struktura dle obr. 3.2 Rozložení intenzity elektrického pole je znázorněno na obr. 3.3 . Výsledné parametry jsou vyobrazeny na obr. 3.4.

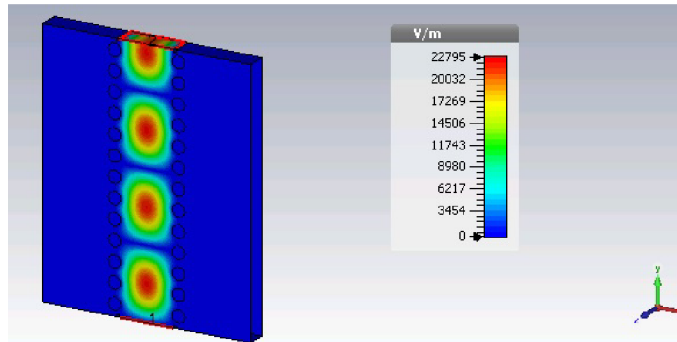


Obr. 3.2: Vytvořená struktura SIW

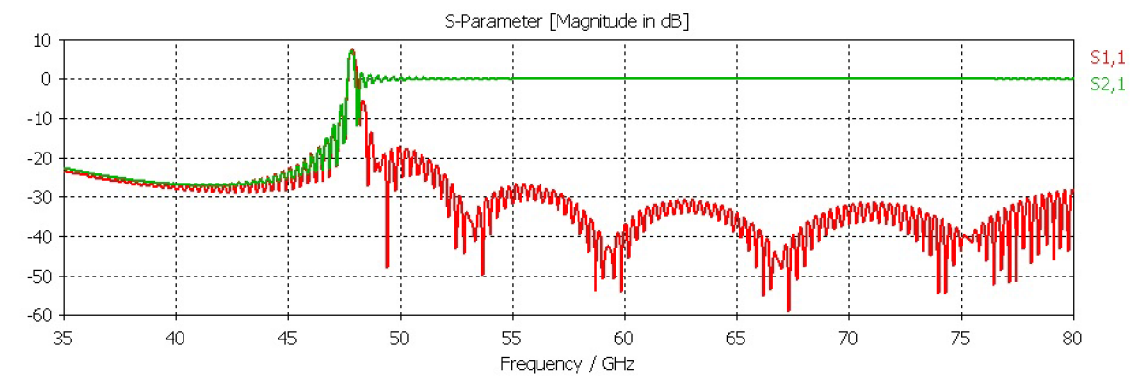
### 3.1.2 Přizpůsobení SIW k napájecímu vedení

Tato kapitola se bude zabývat dvěma způsoby řešení. První způsob uvažuje připojení SIW struktury k napájecí pomocí mikropáskového vedení. Druhá varianta předpokládá připojení struktury ke kovovému vlnovodu pomocí schodovitého přechodu.

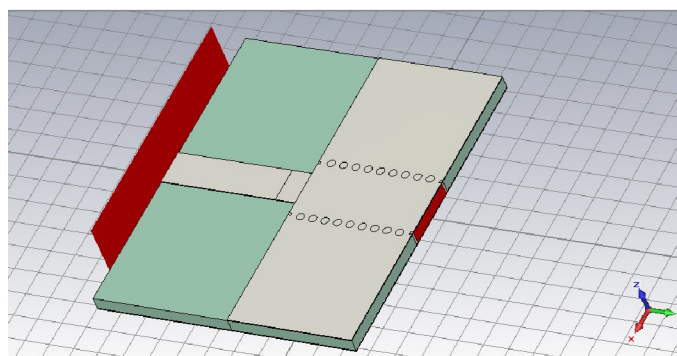
Článek [18] se zabývá problematikou přizpůsobení přechodu napaječe k SIW pomocí mikropásku. Tento typ přechodu byl využit v ranné fázi simulací. Ovšem v daném případě, výpočty dle vztahů zde uvedených nevedly k požadovanému výsledku, a proto byla šířka  $w$  a délka  $l$  zkosení hledána parametrickým rozmítáním v simulačním programu CST Microwave Studio. Vyobrazení struktury je na obr. 3.5.



Obr. 3.3: Rozložení příčné složky intenzity elektrického pole v SIW pro  $f = 60$  GHz.

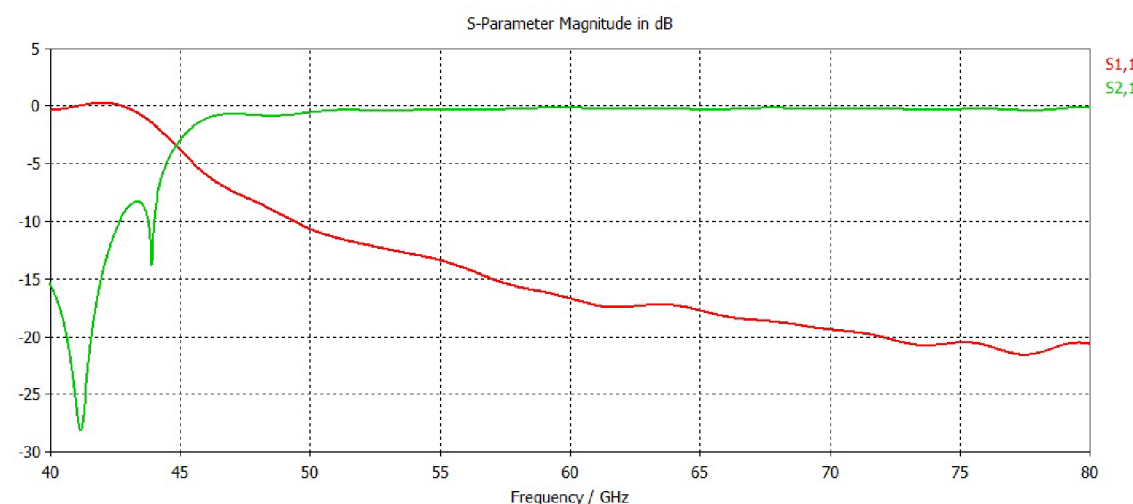


Obr. 3.4: Kmitočtový průběh parametru  $S_{11}$  (červená) a  $S_{21}$  (zelená) SIW struktury



Obr. 3.5: Přizpůsobení přechodu mezi SIW a mikropáskem pomocí zkosení

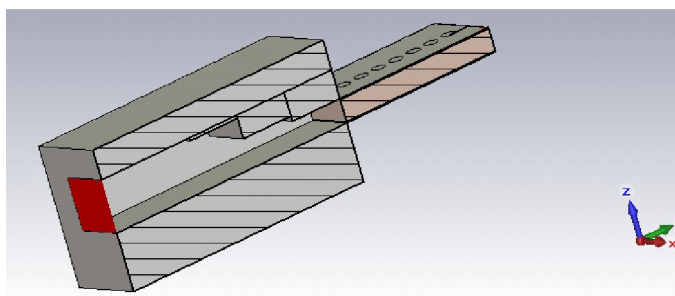
Při řešení modelu bylo zjištěno několik komplikací. Pro daný materiál substrátu, pracovní kmitočet a výšku substrátu je problematické zajistit vhodné přizpůsobení. Šířka mikropásku, s charakteristickou impedancí  $50 \Omega$ , je příliš velká nato, aby mohl být využit vztah z článku [18]. Proto bylo zvoleno zkosení rovno šířce mikropásku, které zajistí činitel odrazu  $S_{11}$  na kmitočtu 60 GHz lepší jak -15 dB. Rozptylové parametry jsou vyobrazeny na obr. 3.6



Obr. 3.6:  $S_{11}$  (červená) a  $S_{21}$  (zelená) parametry přechodu pomocí zkosení v závislosti na frekvenci

Z důvodu, že simulovaná struktura měla být vyrobena, bylo potřeba řešit vhodné připojení k měřicímu zařízení. Předpokládáno bylo využití koaxiálního konektoru. Po uvážení o vhodnosti samotného konektoru a jeho spojení s mikropáskem v daném kmitočtovém pásmu (60 GHz), bylo potřeba najít vhodnější řešení.

Dále tedy byl simulován přechod z konvenčního vlnovodu na strukturu SIW pomocí schodové struktury. Příklad takové struktury je vyobrazen na obr. 3.7.

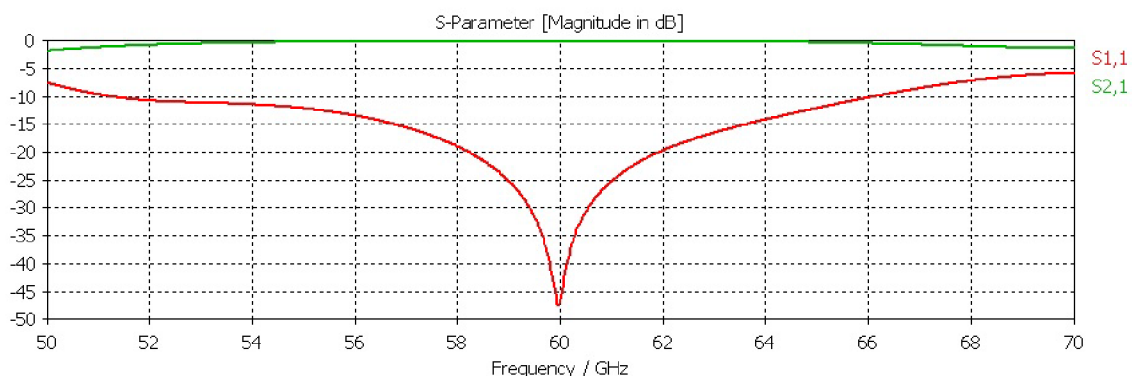


Obr. 3.7: Model schodovitého přechodu mezi SIW a vlnovodem v řezu

Důležitým parametrem je šířka schodů, která je jednotná pro všechny schody, dalším kritickým parametrem je samotná výška schodů. K dosažení výsledků bylo



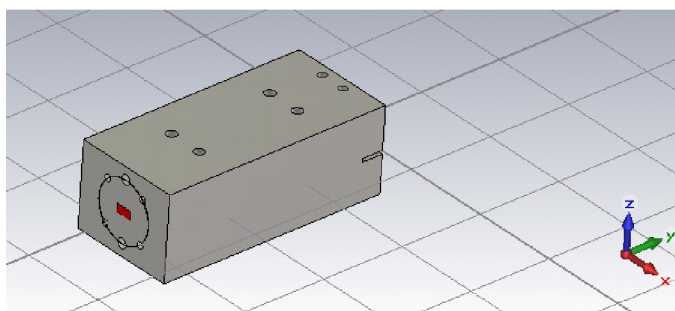
využito parametrického rozmítání v programu CST Microwave Studio. Dosažené výsledky jsou na obr. 3.8



Obr. 3.8: Frekvenční závislost S11 (červená) a S21 (zelená) parametru schodovitého přizpůsobení

Z výsledných simulací byly určeny optimální rozměry schodovitého přechodu jako:

- Šířka schodů je 2,18 mm
- Výška prvního (menšího) schodu je 0,12 mm
- Výška druhého (většího) schodu je 0,9 mm



Obr. 3.9: Model dílce schodovitého přechodu

Na obr. 3.9 je vyobrazen model přechodu. Jedná se vlnovod s vnitřními rozměry odpovídající rozměrům vlnovodu WR-10 (3,76 mm x 1,88 mm). Na straně SIW je vytvořena drážka pro zasunutí motivu, který je následně přichycen pomocí dvou šroubů M2. Na straně konvenčního vlnovodu bude umístěna příruba (redukce), která zajistí přechod z vlnovodu WR-10 na požadovaný vlnovod, použitý v měřicím přístroji.

Vlastní díl se bude skládat ze dvou částí z důvodu vyrobitelnosti. Součást bude rozdělena v horizontální rovině, kdy v jednom díle bude vytvořena drážka o rozměrech vlnovodu. Také zde bude vytvořen schodovitý přechod a drážka pro SIW strukturu. Druhá polovina slouží pouze jako krycí díl. Dílce jsou spojeny pomocí šroubů M2.

Menší komplikaci činí malé rozměry prvků charakteristické pro dané kmitočtové pásmo. Výroba samotného přechodu byla realizována z hliníkového bloku na CNC vrtačce s tolerancí  $\pm 0.03\text{mm}$ .

### 3.2 Sektorová trychtýřová SIW anténa

Toto řešení bylo zvoleno z důvodu jednoduchého napojení na strukturu SIW. Vlnovodné trychtýřové antény se vyznačují jednoduchou výrobou, vysokým ziskem a směrovostí. Na struktuře plošného spoje jsme však omezeni výškou substrátu, proto rozšíření ústí je možné pouze v horizontálním rozměru (H-rovina). Právě díky omezené výšce substrátu dochází k formování hlavního vyzařovacího laloku v rovině kolmé na širší rozměr ústí. Ilustrace je vyobrazena na obr. 3.10. Geometrická struktura trychtýře je uvedena níže na obr. 3.11



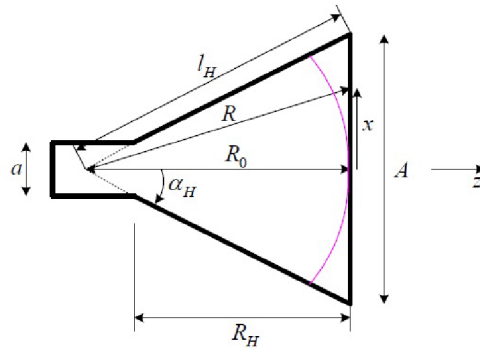
Obr. 3.10: Vyobrazení sektorové trychtýřové antény vyzařující v H-rovině [21]

Jako počáteční bod návrhu antény byl vztah pro optimální směrovost dle rovnice 3.6 [21] .

$$A = \sqrt{3 \cdot \lambda \cdot R_0} \quad (3.6)$$

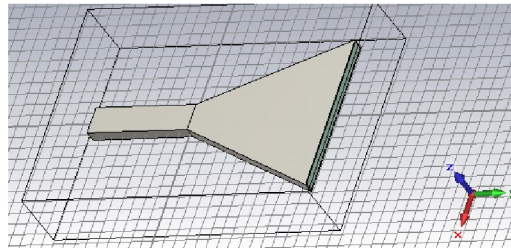
kde:

$A$	šířka ústí
$\lambda$	vlnová délka
$R_0$	délka ústí

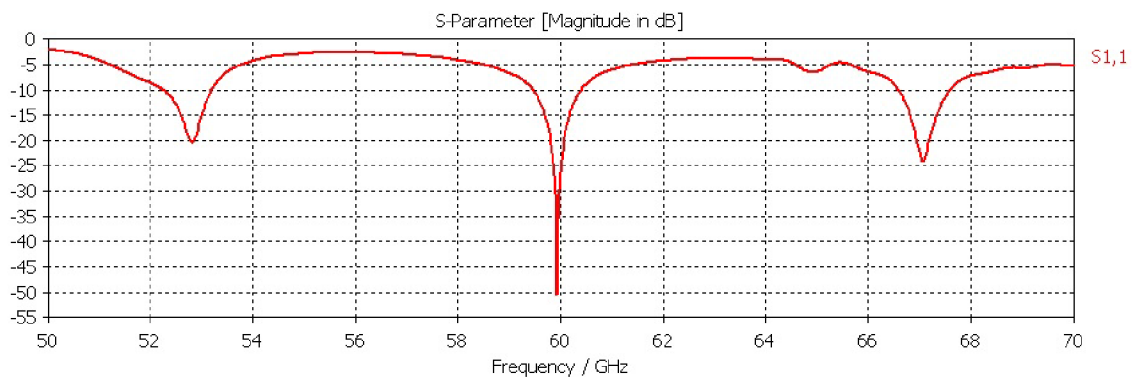


Obr. 3.11: Geometrie trychtýřové antény[21]

Zvolíme tedy délku  $R_0$  a vypočteme šířku ústí. Dalším rozmítáním parametrů  $(A, R_0)$  a za pomoci optimalizace byla anténa upravena. Výchozím bodem byla simulace trychtýřové antény vyplněné dielektrikem. Vyobrazení je na obr. 3.12. Přizpůsobení antény je na obr. 3.13.

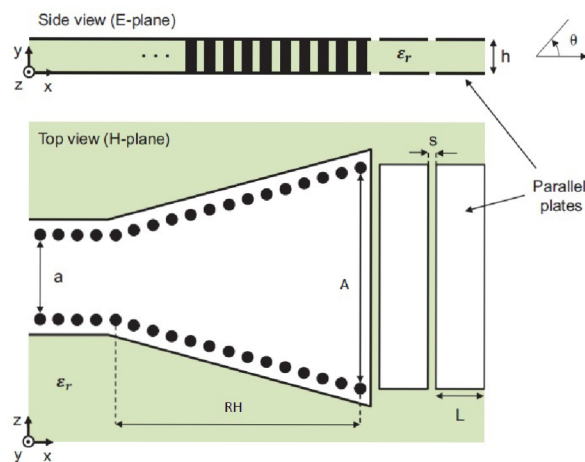


Obr. 3.12: Model trychtýřové antény na vlnovodu vyplněné dielektrikem



Obr. 3.13: Činitel odrazu trychtýřové antény v závislosti na frekvenci

Z vyobrazení činitele odrazu je vidět, že přizpůsobení je úzkopásmové ( $S_{11} < -10$  dB v pásmu 59,6 až 60,4 GHz). V článku [22] je popsána metoda právě pro zvětšení šířky pásma a také zlepšení FTBR (předo-zadní poměr – Front To Back Ratio). Je



Obr. 3.14: Ukázka antény s vloženým rezonátorem [22]

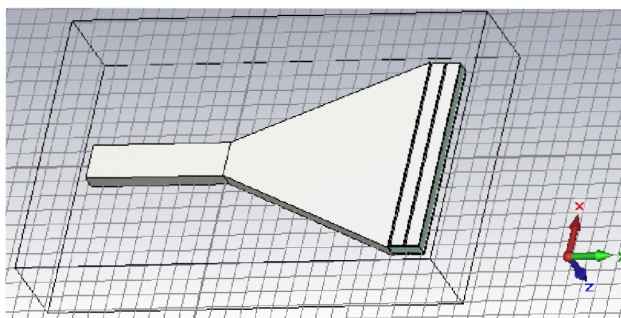
využito periodické struktury, kdy před ústím antény jsou vloženy kovové pásy. Ty se chovají jako rezonátory na určitém kmitočtu. Nákres takového řešení je na obr. 3.14.

$s$  je vzdálenost mezi dvěma pásky a její volbou určujeme vazbu mezi pásky. Šířka pásky je rovna šířce ústí antény. Dle vztahu 3.7 [22] vypočteme délku  $L$  jednoho pásky rezonátoru.

$$L = \frac{c}{2 \cdot f_p \cdot (1 + \sqrt{\epsilon_{er}})} \quad (3.7)$$

kde:

- $L$  délka rezonátoru
- $c$  rychlost světla
- $f_p$  pracovní kmitočet
- $\epsilon_{er}$  efektivní permitivita

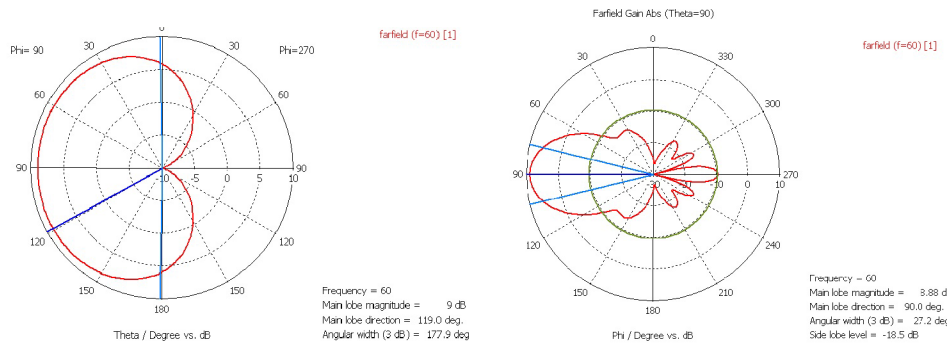


Obr. 3.15: Model sestavy antény s rezonátory

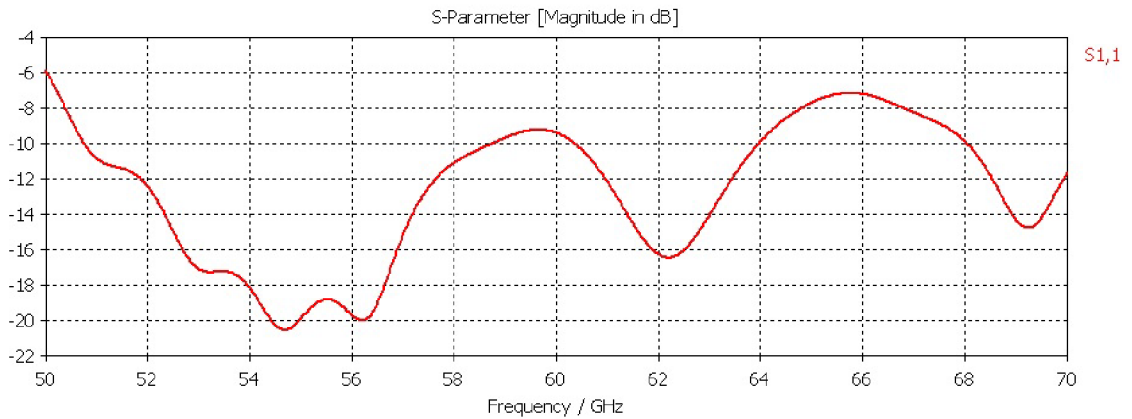
Metoda z článku [22] popisuje vliv přidání vodivých pásků. Struktura obsahující dvě dvojice pásků s vypočtenou šířkou  $L$  významně ovlivní FTBR. Dojde také k rozladění přizpůsobení  $S_{11}$  samotné antény. Na obr. 3.15 je vyobrazen model sestavy antény spolu s přidávanými rezonátory. Anténa je optimalizována pro FTBR, její parametry jsou uvedeny v tab. 3.2.

$A$ [mm]	$R_H$ [mm]	$L$ [mm]	$s$ [mm]
12,63	11,93	0,85	0,15

Tab. 3.2: Parametry trychtýřové antény s rezonátory



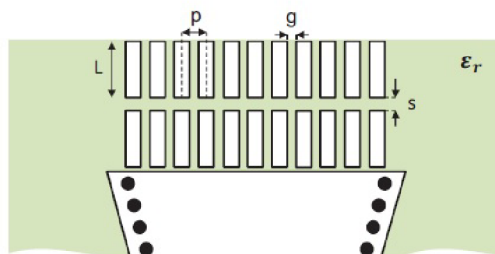
Obr. 3.16: Směrové charakteristiky v E a H-rovině antény s rezonátory,  $f = 60$  GHz



Obr. 3.17: Kmitočtová závislost  $S_{11}$  parametru antény s rezonátory

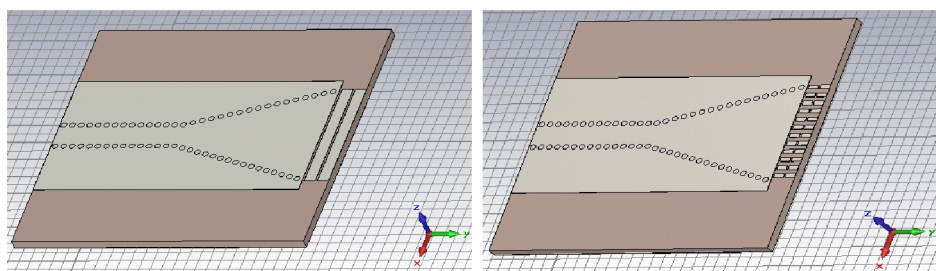
Ze směrových charakteristik v E-rovině a H-rovině (obr. 3.16) můžeme odečíst FTBR, které odpovídá zhruba 18 dB. Přidání rezonátoru má také vliv na parametr  $S_{11}$ , kdy dojde k jeho rozladění od požadovaného kmitočtu ( $S_{11}$  je na obr. 3.17). Tento jev popisuje článek [22]. V článku je korigováno posunutí  $S_{11}$  parametru pomocí změny struktury rezonátoru. Jednotlivé vodivé pásky se rozdělí na

další soustavu elementů (zobrazeno na obr. 3.18). Rozdělení pásků způsobuje změnu efektivní permitivity, to přispívá právě ke zmenšení vlivu soustavy rezonátorů na parametr S11.

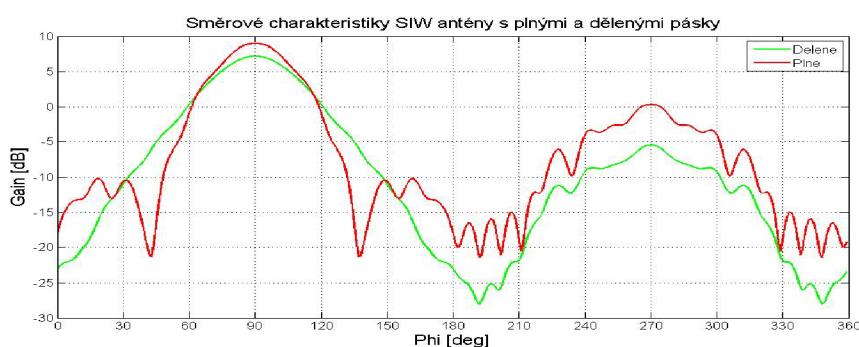


Obr. 3.18: Příklad rozdělení rezonátorů pro zlepšení S11 parametru [22]

Porovnání struktury s plnými rezonátory a rozdělenými rezonátory bylo provedeno již na trychtýřové anténě vytvořené ze struktury SIW. Modely obou typů jsou na obr. 3.19.



Obr. 3.19: Modely SIW antén s plnými a rozdělenými pásky



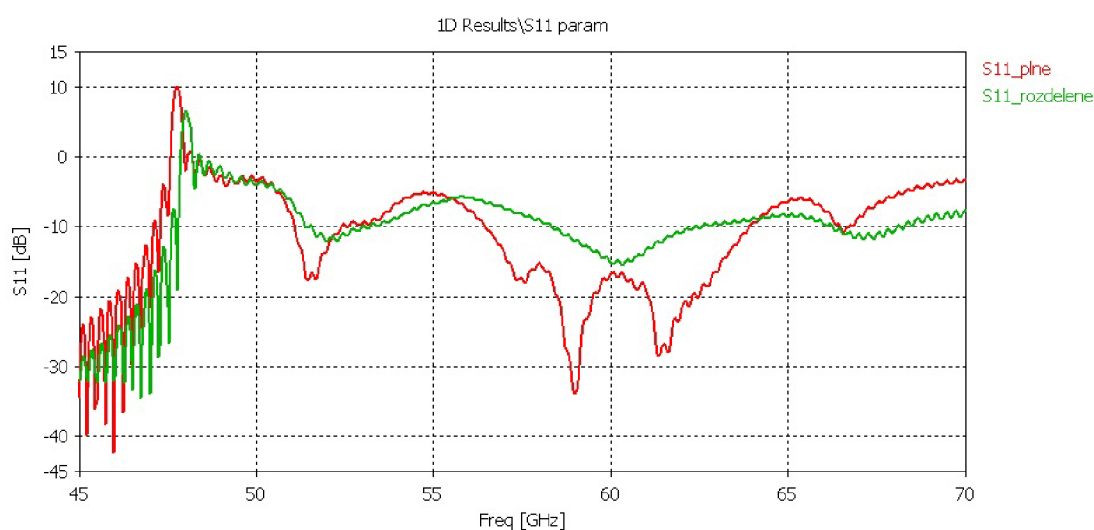
Obr. 3.20: Vyzařovací charakteristiky antén s plnými (červená) a rozdělenými pásky (zelená) v H=rovině,  $f = 60$  GHz.

Na obr. 3.20 můžeme porovnat směrové vyzařovací charakteristiky obou modelů antén. U antény s plnými pásky rezonátorů je vidět přítomnost postranních laloků



a také výrazného zadního laloku. FTBR takového uspořádání je přibližně 8 dB, S11 parametr je zobrazen na obr. 3.21 červenou barvou. Vyzařovací charakteristika SIW antény s rozdělenými pásky je zobrazena zelenou barvou (obr. 3.20). Zde můžeme pozorovat výrazné zlepšení předozadního poměru a také eliminaci bočních laloků. FTBR odpovídá přibližně 12,2 dB. S11 parametr odpovídající této struktuře je vyobrazen na obr. 3.21 zelenou barvou.

Z výše uvedeného porovnání lze usoudit, že se zde objevují dva protichůdné požadavky. Anténa může být tedy navrhována s ohledem na S11 parametr, nebo s důrazem na FTBR. V dalších částech návrhu antény bude kladen důraz na S11 parametr.



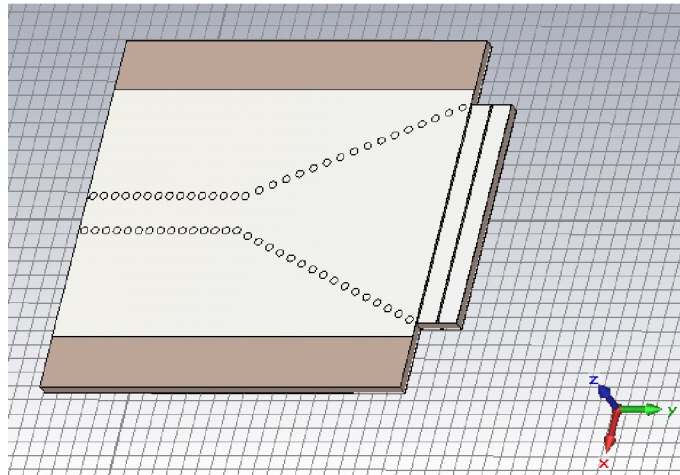
Obr. 3.21: Porovnání S11 SIW antény s plnými pásky (červená) a dělenými (zelená)

Výsledný model struktury této části znázorňuje obr. 3.22. Parametry popisující trychtýřovou anténu jsou uvedeny v tab. 3.3. Pro síť buněk simulátoru bylo využito adaptivní vytvoření, pozadí bylo nastaveno jako normální. S11 parametr je zobrazen na obr. 3.23. Pásmo přizpůsobení antény (kdy S11 je pod hranicí -10 dB) se nachází od kmitočtu 57 GHz do 64,2 GHz. Směrové vyzařovací charakteristiky v E-rovině a H-rovině jsou znázorněny na obr. 3.24.

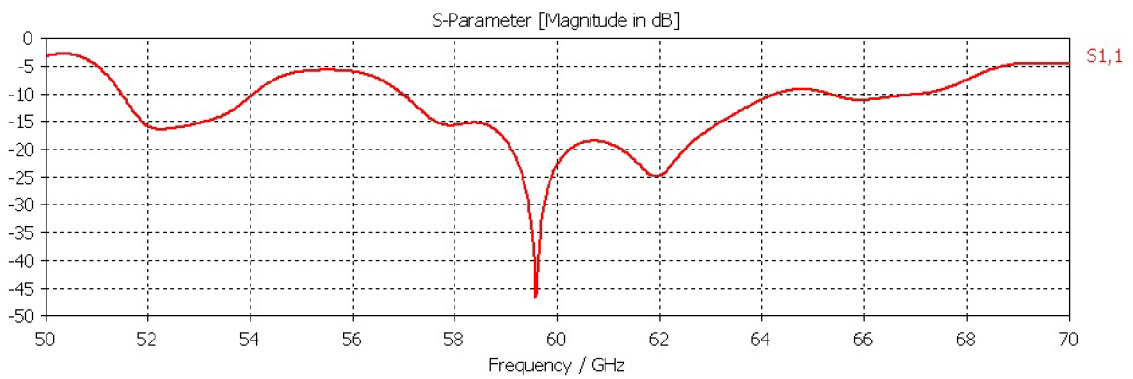
$A$ [mm]	$R_H$ [mm]	$L$ [mm]	$s$ [mm]
15,8	13,34	1,3	0,12

Tab. 3.3: Parametry výsledné trychtýřové antény s rezonátory

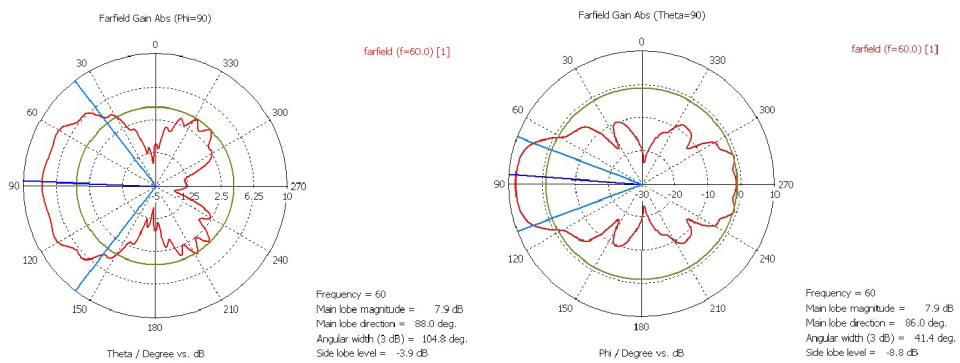
Anténa bude vyrobena na substrátu Arlon CuClad 217, tloušťky 0,7874 mm a o relativní permitivitě 2,17. Z důvodu malých rozměrů a potřebné přesnosti bude při výrobě použito laserové gravírování.



Obr. 3.22: Konečný model SIW antény



Obr. 3.23: Kmitočtový průběh S11 parametru konečného modelu SIW trychtýřové antény

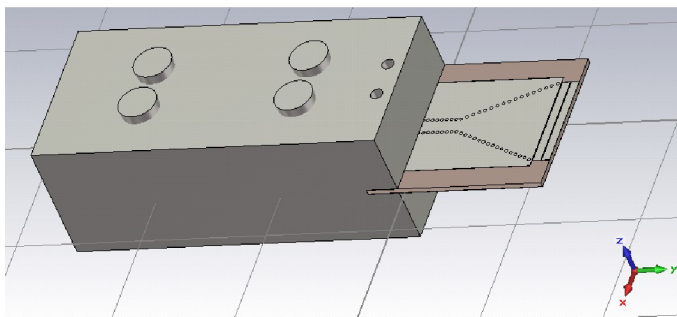


Obr. 3.24: Vyzářovací charakteristika v E-rovině (vlevo) a H-rovině,  $f = 60$  GHz

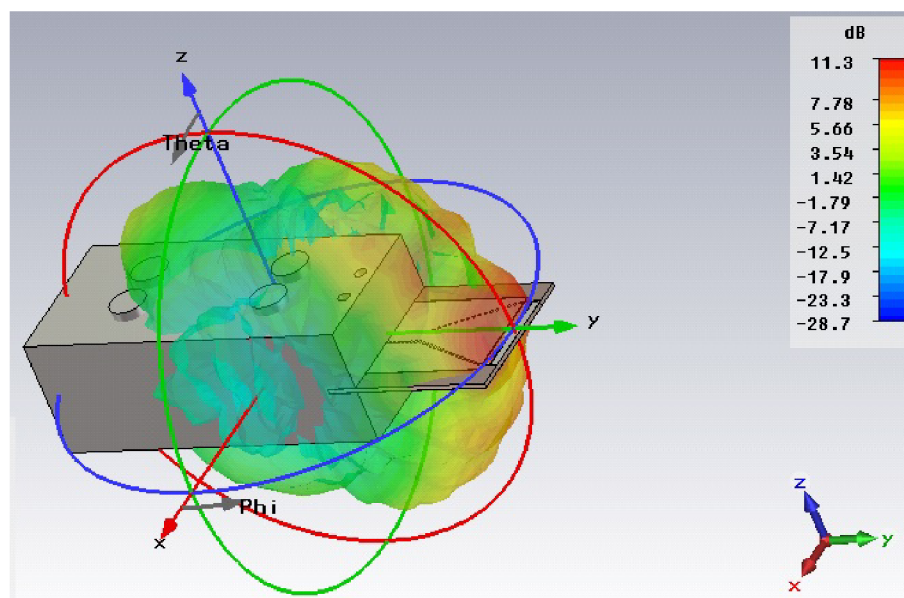


### 3.3 Sjednocení napáječe a antény

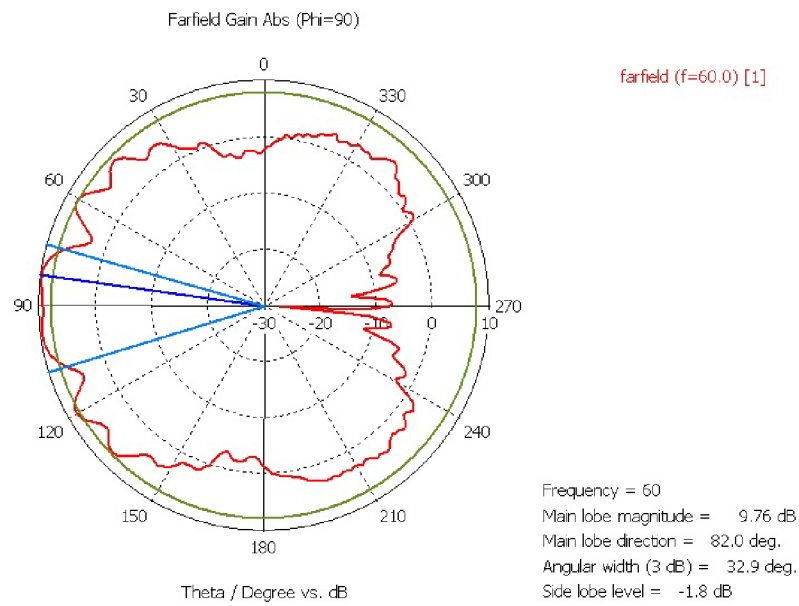
Zde jsou vyobrazeny výsledky simulací po spojení napáječe a antény s použitím technologie SIW. Na obr. 3.25 je vyobrazena celková sestava napáječe a antény. Na obr. 3.26, obr. 3.27 a obr. 3.28 jsou směrové vyzařovací charakteristiky. Na vyzařovacích charakteristikách lze pozorovat vliv hliníkové přechodky. Přechodka se chová jako reflektor a dochází k deformaci vyzařovací charakteristiky antény v přímém směru. Ideálním řešením je maximalizace FTBR. Jak bylo řečeno dříve, zlepšení parametru FTBR je na úkor zhoršení činitele odrazu a v této práci je dána přednost parametru S11. Zmírnění vlivu odrazů od přechodky bude realizováno pomocí absorbéru připevněných k čelním plochám přechodky. Činitel odrazu S11 celku je vyobrazen na obr. 3.29.



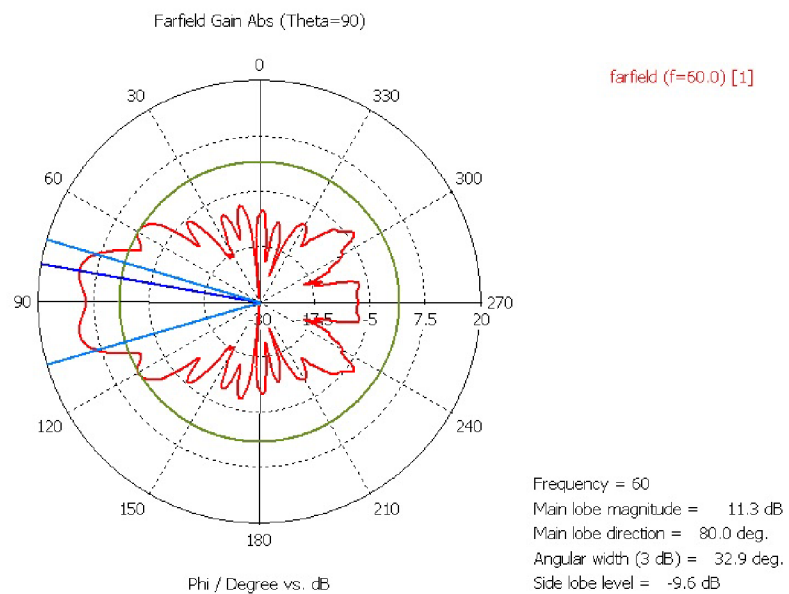
Obr. 3.25: Model celkové sestavy napáječe a SIW antény



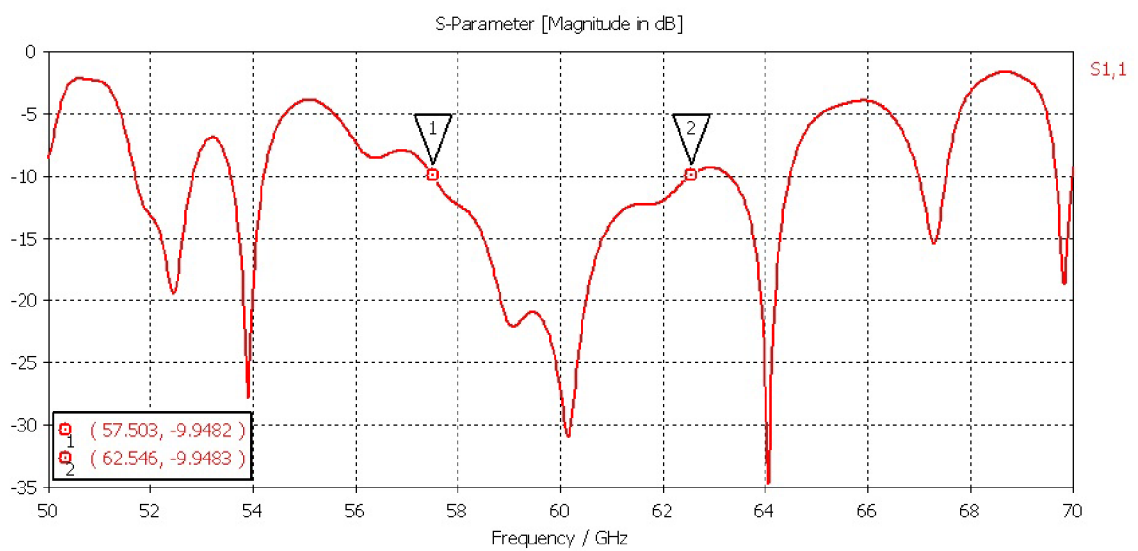
Obr. 3.26: Směrová charakteristika celkového modelu antény a napáječe,  $f = 60$  GHz



Obr. 3.27: Vyzařovací charakteristika v E-rovině celkové sestavy napáječe a antény,  $f = 60$  GHz



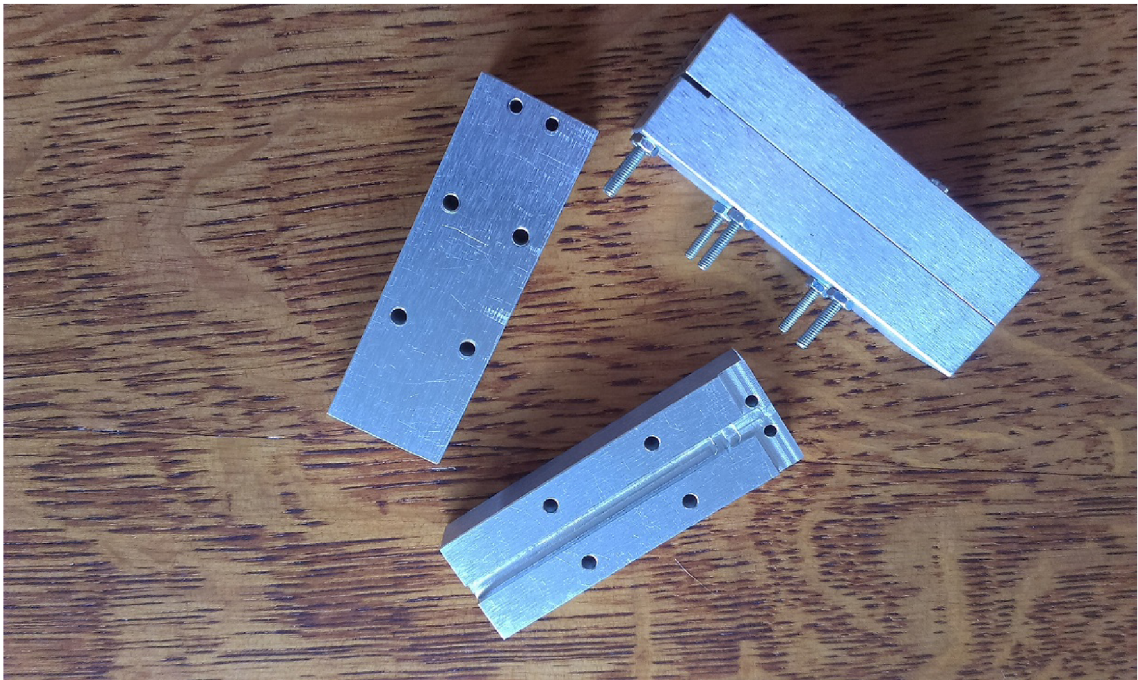
Obr. 3.28: Vyzařovací charakteristika v H-rovině celkové sestavy napáječe a antény,  $f = 60$  GHz



Obr. 3.29: Frekvenční závislost činitele odrazu celkového modelu napáječe antény

## 4 REALIZACE NÁVRHU

Realizace spočívá ve výrobě přechodky z vlnovodu WR10 na SIW. Reduktor je sestaven ze dvou obrobek hliníkových dílů (výkresová dokumentace je uvedena v příloze), které jsou spojeny pomocí 6ti šroubů. Problémem zde byly relativně malé rozměry dílu a potřebná přesnost v řádu setin milimetru. Samotná výroba byla realizována pomocí CNC vrtačky s průměrem nástroje 2mm. Zhotovené části přechodky jsou na obr. 4.1



Obr. 4.1: Vyobrazení výrobku

## 5 ZÁVĚR

Dokument v první části srovnává komerčně dostupné moduly pracující v okolí kmitočtu 60 GHz. Dále jsou uvedeny návrhové vztahy, modely a simulace antény s napáječem. Byly simulovány dva různé přechody, jeden pomocí zkosení mezi mikropáskovým napáječem a SIW. Druhý s využitím schodovitého přechodu z vlnovodu na SIW trychtýřovou anténu. Výsledkem konečné simulace antény bylo dosažení činitele odrazu pod hodnotu -10 dB v rozsahu kmitočtů 57,5 až 62,5 GHz. Při zisku 11,3 dBi v rovině desky substrátu na kmitočtu 60,0 GHz.

Široká směrová charakteristika v E-rovině byla způsobena nízkou výškou substrátu. Problémem bylo také dosažení příznivých výsledku současně pro předozadní poměr a činitel odrazu sestavy zářiče. V konečném řešení byl kladen důraz na příznivý kmitočtový průběh činitele odrazu.

V době odevzadání dokumentu byl zhotoven pouze schodovitý přechod. Výroba planární SIW antény neočekávaně přesáhla plánovanou dobu a nebyla prozatím vyrobena. Měření vlastních parametrů antény spolu s komplexním měřením v interiéru automobilu tedy nebylo dosud splněno. Výsledky měření by měly být zpracovány v prezentaci k diplomové práci.

## LITERATURA

- [1] DANIELS, Robert, James MURDOCK, Theodore RAPPAPORT a Robert HEATH. *60 GHz Wireless: Up Close and Personal*. *IEEE Microwave Magazine*[online]. 2010, vol. 11, issue 7, s. 44-50 [cit. 2013-11-12]. DOI: 10.1109/MMM.2010.938581. Dostupné z URL: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5590362>>.
- [2] WOLANSKÝ, David a Petr VŠETULA. *Nové technologie pro mikrovlnné spoje: Definice architektury a experimentální mikrovlnný spoj v pásmu 75/85 GHz Úvodní studie: Analýza řešení, zpracování programového projektu*. BRNO, 2013. Výzkumná zpráva. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky.
- [3] DANIELS, Robert a Robert HEATH JR. *60 GHz wireless communications: emerging requirements and design recommendations*. *IEEE Vehicular Technology Magazine* [online]. 2007, vol. 2, issue 3, s. 41-50 [cit. 2013-12-11]. DOI: 10.1109/MVT.2008.915320. Dostupné z URL: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4457895>>.
- [4] AGILENT TECHNOLOGIES. *Wireless LAN at 60 GHz - IEEE 802.11ad Explained*[online]. 2013 [cit. 2013-11-30]. Dostupné z URL: <<http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5990-9697EN.pdf>>.
- [5] BAYKAS, Tuncer, Chin-Sean SUM, Zhou LAN, Junyi WANG, M. RAHMAN, Hiroshi HARADA a Shuzo KATO. *IEEE 802.15.3c: the first IEEE wireless standard for data rates over 1 Gb/s*. *IEEE Communications Magazine* [online]. 2011, vol. 49, issue 7, s. 114-121 [cit. 2013-11-30]. DOI: 10.1109/MCOM.2011.5936164. Dostupné z URL: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5936164>>.
- [6] Gotmic. GOTMIC AB. [online]. [cit. 2013-12-01]. Dostupné z URL: <<http://www.gotmic.se/txrx.html>>.
- [7] Gotmic. GOTMIC AB. *T60GHzTX2: 60 GHz multifunctional mHEMT Transmitter*. [online]. [cit. 2013-12-02]. Dostupné z URL: <[http://www.gotmic.se/documents/60GHz\\_TX\\_mHEMT.pdf](http://www.gotmic.se/documents/60GHz_TX_mHEMT.pdf)>.
- [8] Gotmic. GOTMIC AB. *TXQ060A01 Transmitter 60 GHz*[online]. [cit. 2013-12-02]. Dostupné z URL: <<http://www.gotmic.se/documents/TXQ060A01.pdf>>.

- [9] HITTITE MICROWAVE CORP. *Transceiver Chips Corral MM Waves*. [online]. 2012 [cit. 2013-12-02]. Dostupné z URL: <<http://mwrfl.com/analog-semiconductors/transceiver-chips-corral-mm-waves>>.
- [10] HITTITE MICROWAVE CORP. [online]. 2012 [cit. 2013-12-02]. Dostupné z URL: <<http://www.hittite.com/products/index.html/category/395>>.
- [11] Sivers Ima. *FC1005V/00 58-63 GHz V-band Converter with LO* [online]. [cit. 2013-12-02]. Dostupné z URL: <<http://www.siversima.com/wp-content/uploads/2013/05/SPLT6202-FC1005V00-Converter-Data-Sheet-Rev-B.pdf>>.
- [12] Sivers Ima. [online]. [cit. 2013-12-04]. Dostupné z URL: <<http://www.siversima.com/products/millimeter-wave-converters/>>.
- [13] Peraso. *PRS1021 Low Power 60 GHz Transceiver, Product Brief 2012-09-10* [online]. [cit. 2013-12-05]. Dostupné z URL: <[http://www.perasotech.com/gp\\_product/consumer-ic-products/](http://www.perasotech.com/gp_product/consumer-ic-products/)>.
- [14] Peraso. *PRS1021 Development Board, Product Brief 2013-12-1* [online]. [cit. 2013-12-05]. Dostupné z URL: <[http://www.perasotech.com/gp\\_product/consumer-development-kits/](http://www.perasotech.com/gp_product/consumer-development-kits/)>.
- [15] PROKEŠ, Aleš. *Rádiové přijímače a vysílače: přednášky* [online]. 1. vyd. Brno: VUT FEKT, 2003, 174 s. [cit. 2013-12-11]. ISBN 80-214-2263-7.
- [16] BUCHS, Just-Dietrich a Gunther BEGEMANN. *Frequency conversion using harmonic mixers with resistive diodes*. [online]. [cit. 2013-12-05]. Dostupné z URL: <<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/abstractAuthors.jsp?arnumber=4807471>>.
- [17] DESLANDES, D. a KE WU. *Accurate modeling, wave mechanisms, and design considerations of a substrate integrated waveguide*. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques [online]. 2006, vol. 54, issue 6, s. 2516-2526 [cit. 2014-05-11]. DOI: 10.1109/TMTT.2006.875807. Dostupné z URL: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1643580>>.
- [18] DESLANDES, Dominic. *Design equations for tapered microstrip-to-Substrate Integrated Waveguide transitions*. [online]. IEEE, 2010, s. 704-707 [cit. 2013-12-19]. DOI: 10.1109/MWSYM.2010.5517884. Dostupné z URL: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5517884>>.



- [19] KE WU, D. DESIANDES a Y. CASSIVI. *The substrate integrated circuits - a new concept for high-frequency electronics and optoelectronics*. [online]. 6th International Conference on Telecommunications in Modern Satellite, Cable and Broadcasting Service, 2003. TELSIS 2003. IEEE, 2003, P-III-P-X [cit. 2013-12-19]. DOI: 10.1109/TELSIS.2003.1246173. Dostupné z URL: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1246173>>.
- [20] BERGE, Layne A. a Benjamin D. BRAATEN. *Comparison on the Coupling Between Substrate Integrated Waveguide and Microstrip Transmission Lines for Antenna Arrays. Antennas and Propagation (EuCAP), 2013 7th European Conference on* [online]. 2416 - 2419 [cit. 2013-12-19] Dostupné z URL: <[http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=6546727&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs\\_all.jsp%3Farnumber%3D6546727](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=6546727&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D6546727)>.
- [21] *LECTURE 18: Horn Antennas (Rectangular horn antennas. Circular apertures.)* [online]. [cit. 2013-12-19] Dostupné z URL: <[http://www.ece.mcmaster.ca/faculty/nikolova/antenna\\_dload/current\\_lectures/L18\\_Horns.pdf](http://www.ece.mcmaster.ca/faculty/nikolova/antenna_dload/current_lectures/L18_Horns.pdf)>.
- [22] *Antennas and Propagation (ISAP), 2012 International Symposium on: A new type of printed Ku-band SIW horn antenna with enhanced performances* [online]. S.l.: [s.n.], 223 - 226 [cit. 2013-12-20]. ISBN 9781467310017. Dostupné z URL: <<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=6393892&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fiel5%2F6381732%2F6393716%2F06393892.pdf%3Farnumber%3D6393892>>.



## SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

WiFi typ bezdrátové sítě – Wireless Fidelity

PAN osobní sítě – Personal Area Network

WLAN bezdrátové lokální sítě – Wireless Local Area Network

CMOS komplementární polovodiče na bázi metal-oxidu – Complementary Metal Oxide Semiconductor

MAC přístupová metoda k médiu – Medium Access Control

MMIC monolitický mikrovlnný integrovaný obvod – Monolithic microwave integrated circuit

HEMT tranzistor s vysokou pohyblivostí elektronů – High electron mobility transistor

IQ soufázová a kvadrurní složka – Inphase and Quadrature

AiP anténa integrovaná v pouzdru – Antenna in Package

BiCMOS kombinace bipolárních a CMOS tranzistorů na jednom čipu

USB univerzální seriové rozhraní – Universal Serial Bus

SPI seriové komunikační rozhraní – Serial Peripheral Interface

GPIO obecně vstupně/výstupní porty – General Purpose Input/Output

IF mezifrekvenční signál – Intermediate Frequency

LO nosná frekvence – Local Oscillator

RF vysokofrekvenční signál – Radio Frequency

SIW vlnovodná struktura na substrátu – Substrate Integrated Waveguide

CNC číslicové řízení počítačem – Computer Numeric Control

FTBR předo-zadní poměr – Front To Back Ratio

# SEZNAM PŘÍLOH

<b>A</b>	<b>Pomocné skripty v prostředí Matlab</b>	<b>46</b>
A.1	Skript grafického vyobrazení přenosové rychlosti na vzdálenosti . . .	46
A.2	Skrip pro výpočet SIW vlnovodu a přechodu na mikropásek . . . . .	47
<b>B</b>	<b>Výkresová dokumentace</b>	<b>49</b>
B.1	Přechodka WR10-SIW . . . . .	49
B.2	Motiv trychtýřové antény . . . . .	51

# A POMOCNÉ SKRIPTY V PROSTŘEDÍ MATLAB

## A.1 Skript grafického vyobrazení přenosové rychlosti na vzdálenosti

```
k = 1.380650*10^-23;      % Boltzmann's constant J/K
T = 290;                 % effective temperatue in K
c = 3e8;                 % velocity of light
fc = 60.48*10^9;         % carrier frequency
%-----
B = 1.8*10^9;            % bandwidth in GHz
fb=(10:1:100)*10^6;     % raw bitrate

NF = 8;                  % noise figure of reciever in dB
Tx_pow = 10;             %Tx power in dBm
res = 4;                 % reserve of link in dB
Gant = 6;                % antenne Gain in dB
%-----
%BPSK EB/NO (BER 10^-6)
Eb_No = 11.1;            %dB

% 16 QAM EB/NO (BER 10^-6)
%Eb_No = 18.5;

%-----

C_N = Eb_No + 10*log10(fb/B); % carrier to noise in dB

N = k*T*B*1000;          % Noise power *1000 due to transfer to mW
NdB = 10*log10(N);       % Noise power in dBm
Ndbf = NdB + NF;         % Noise power with noise figure in dBm

C = C_N + Ndbf;          % min. recieved power in dBm for used modulation
LodB = Tx_pow+2*Gant-C-res; % max path loss in dB

Lo = 10.^(LodB/10);      % dB to [-]
r_max = (sqrt(Lo)*c)/(4*pi*fc); % cimputing of max lenght in m

plot(fb,r_max)           % graphic output

title('bite rate vs max path length')
xlabel('fb [bit/s]')
```

```

ylabel('max length [m]')
clear;
%Lo = ((4*pi*r*fc)/c)^2;
%LodB = 10*log10(Lo)      %free space path loss in dB

%Txpow = C + LodB + res  % required Tx power in dBm

```

## A.2 Skrip pro výpočet SIW vlnovodu a přechodu na mikropásek

```

clear all
close all
clc
fc = 60e9;           %working frequency
c = 3e8;            %velocity of light
er = 2.17;          %permittivity of dielectricum
h = 0.7874e-3;      %height of substrate

d = 0.3e-3          %diameter of VIA
p = 0.5e-3          %VIAs pitch
n=sqrt((4*pi)*10^-7/(8.854e-12)); %impedance of vacuum
%-----

a = c/(2*fc)*1.2;   %width of standard waveguide,1.35 to ensure proper range
aeff = a/sqrt(er)   % effective width

%----- computing width of SIW -----
aeff = 2e-3
aeff1 = 1;
aSIW = aeff;
while abs(aeff1-aeff)>0.00001
    aeff1 = aSIW - (1.08*d^2)/p+(0.1*d^2)/aSIW;
    aSIW = aSIW+0.00001;
end
aSIW

%----- computing width of transition -----

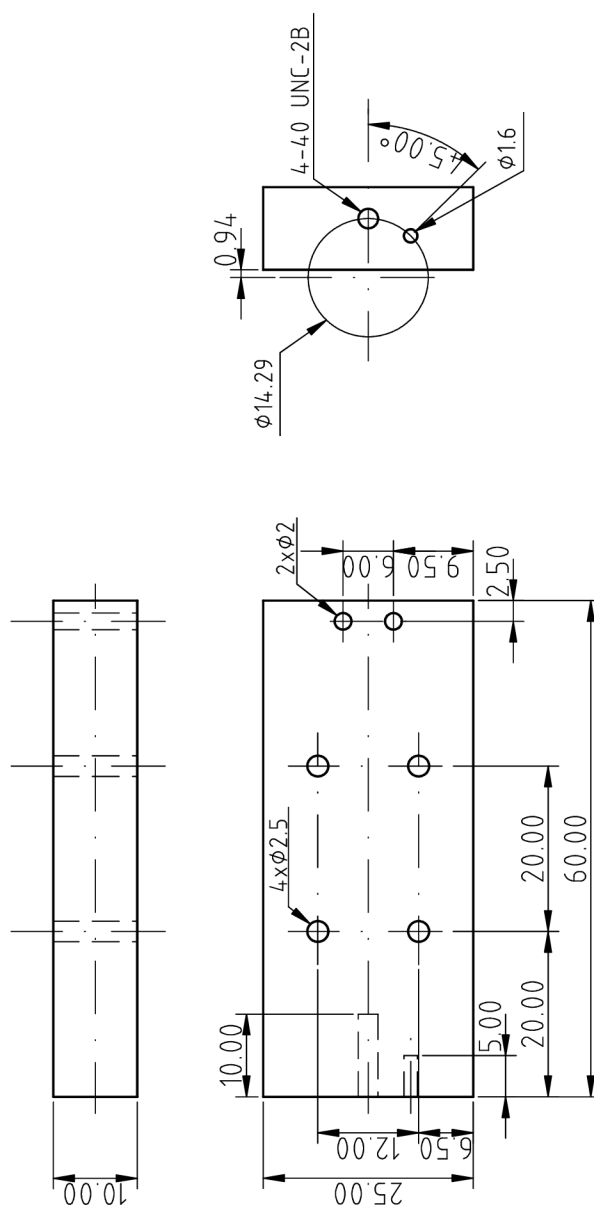
jednawe = 10;
jednawe2 = 0;
w=0.01e-3;
aeff = 2.2e-3
while abs(jednawe-jednawe2)>9
    eef = ((er+1)/2)+((er-1)/2)*(1/sqrt(1+12*h/w));

```

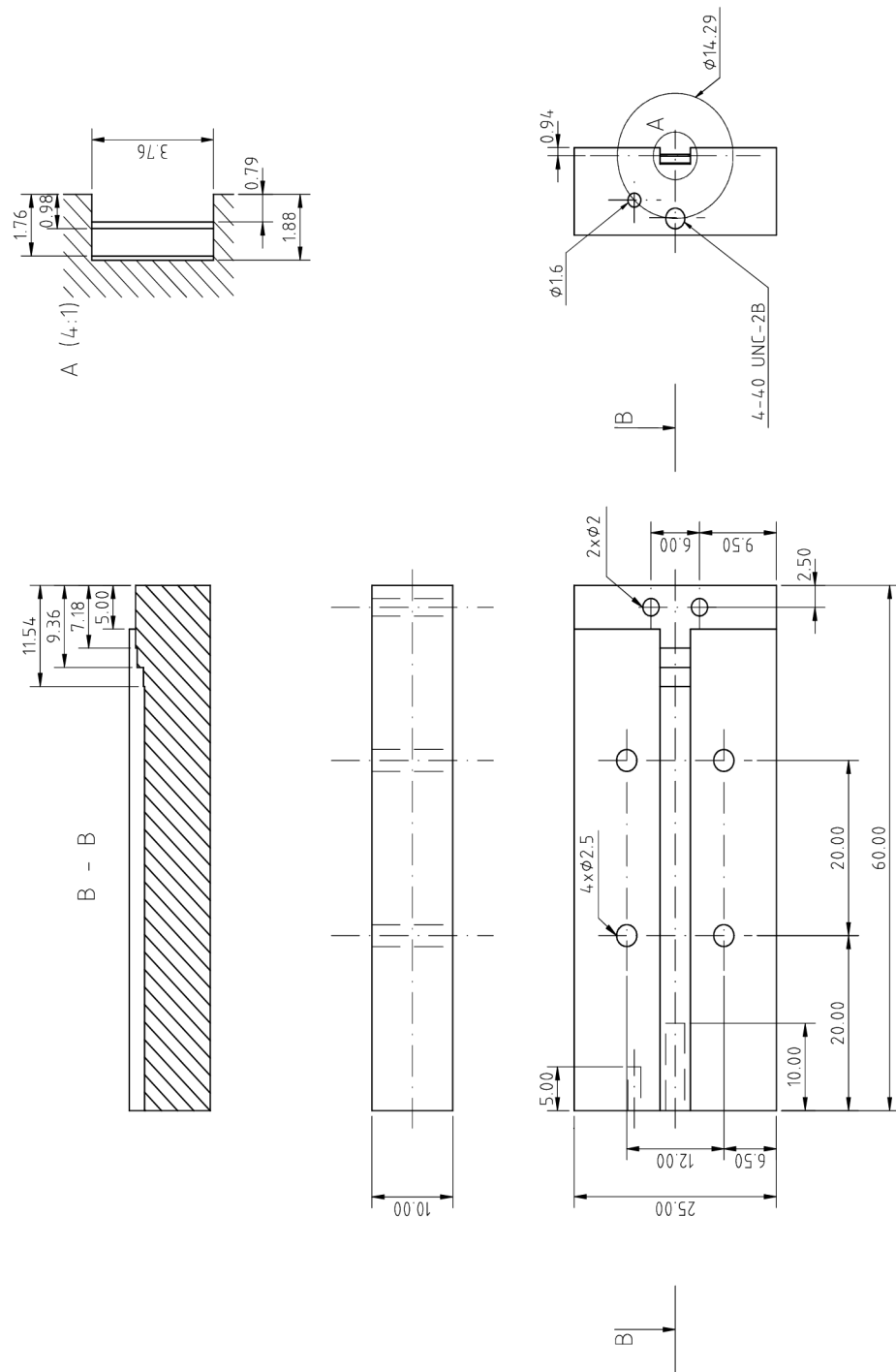
```
jednawe = (4.38/aeff)*exp(-0.627*er/eef);  
hold on  
figure(1)  
plot(w,jednawe)  
if w/h < 1  
    jednawe2 = 60/(n*h)*log(8*h/w+0.25*w/h); %pro w/h < 1  
else  
    jednawe2 = (1)/(h*(w/h+1.393+0.667*log(w/h+1.444)));  
end  
hold on  
plot(w,jednawe2)  
w=w+0.000001;  
end  
w
```

## B VÝKRESOVÁ DOKUMENTACE

### B.1 Přejchodka WR10-SIW

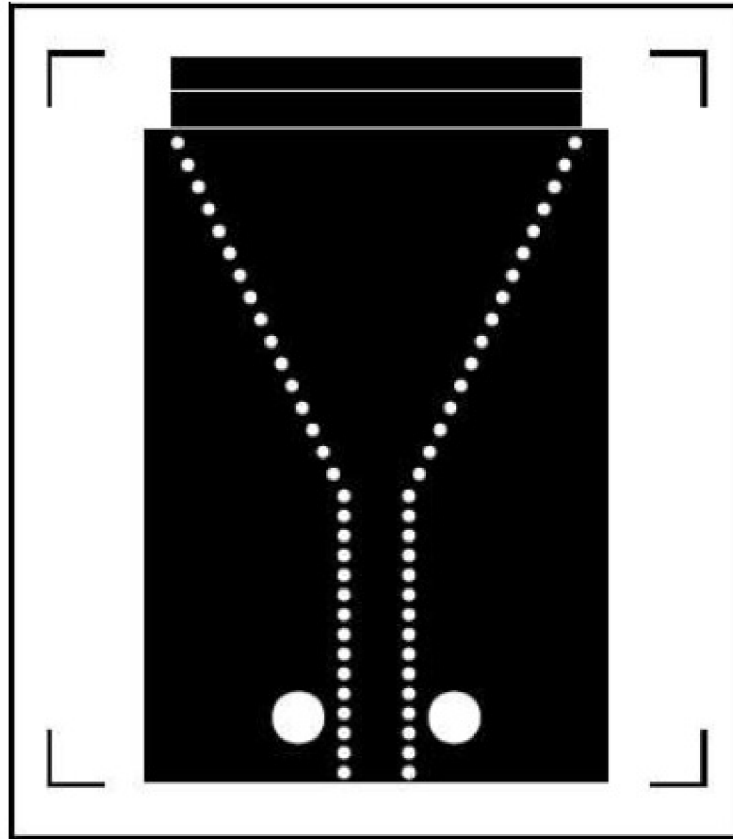


Obr. B.1: Výkres vrchního dílu přechodky WR10-SIW



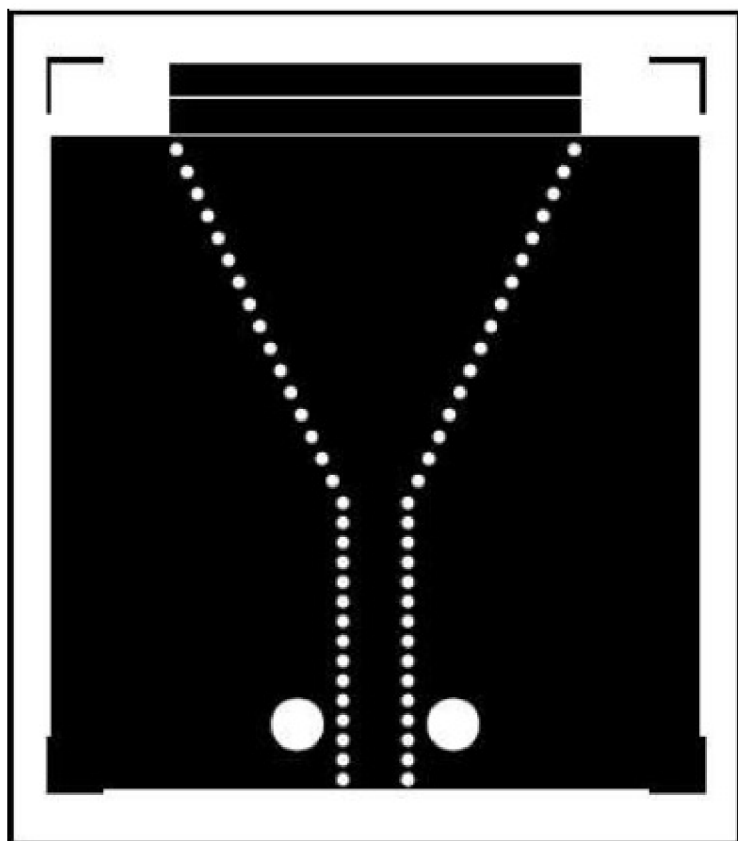
Obr. B.2: Výkres spodního dílu přechodky WR10-SIW

## B.2 Motiv trychtýřové antény



Obr. B.3: Motiv SIW antény TOP v měřítku 3:1





Obr. B.4: Motiv SIW antény BOTTOM v měřítku 3:1